



**Gonçalo Clemente Correia Gonçalves**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Estudo numérico da interação onda-OWSC em agitação regular**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Orientador: Moisés Gonçalves de Brito, Investigador,  
Instituto Superior Técnico  
Co-orientador: Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar,  
Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor José Manuel Paixão Conde  
Arguente: Doutor João Manuel Ribeiro da Costa Baltazar  
Vogal: Doutor Moisés Gonçalves de Brito



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Maio, 2019**



## **Estudo numérico da interação onda-OWSC em agitação regular**

Copyright © Gonçalo Clemente Correia Gonçalves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostava de começar por agradecer ao meu orientador, Moisés Gonçalves de Brito, pela sua constante disponibilidade e pela grande ajuda prestada no desenvolvimento das diversas etapas da dissertação.

Ao meu co-orientador, o Professor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, deixo também uma palavra de apreço e de agradecimento, em especial, pela sua ajuda na revisão do texto e dos conceitos científicos abordados na presente dissertação.

Faço também um agradecimento especial aos meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo não só deste ano, mas de todo o curso.

Por fim, mas não por isso menos importante, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, à minha irmã e ao meu avô, pelo apoio demonstrado permitindo atingir o sucesso pessoal e académico.



## RESUMO

---

Os *Oscillating Wave Surge Converters* (OWSCs) representam uma importante classe de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas (WECS - *Wave Energy Converters*) do tipo corpo oscilante e destinam-se a aproveitar o movimento horizontal das partículas de fluido das ondas, operando assim em zonas junto à costa. Os OWSCs são fundamentalmente constituídos por uma placa oscilante e por um sistema de extração de energia (PTO - *Power Take-Off*). As restrições mecânicas impostas pelo sistema PTO carecem de especial importância no estudo dos OWSCs, em virtude dos complexos fenómenos que descrevem as interações onda-placa oscilante-sistema PTO.

O principal objetivo desta dissertação é criar uma ferramenta numérica capaz de estudar as características hidrodinâmicas da interação onda-OWSC em agitação regular. O programa utilizado é o ANSYS Aqwa. Este programa aplica um método com malha baseado na teoria linear das ondas e na teoria da radiação/difração em 3D. Neste contexto é essencial perceber as propriedades do escoamento. Apresenta-se assim um modelo analítico da agitação baseado na teoria do escoamento potencial.

O modelo numérico, previamente validado através da comparação dos resultados numéricos obtidos com dados experimentais existentes na literatura, é então aplicado para se estudar a influência da inércia da placa oscilante, da agitação e do sistema PTO na hidrodinâmica do OWSC.

Os resultados demonstram que tanto a massa como a altura do centro de massa da placa oscilante não têm influência significativa na dinâmica do OWSC. Por outro lado, as características da agitação regular e do sistema PTO influenciam, de forma significativa, a dinâmica da placa oscilante e, conseqüentemente, a energia extraída pelo OWSC.

**Palavras-chave:** Energia das ondas, *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC), *Power Take-Off* (PTO), Ferramenta numérica, ANSYS Aqwa

---





## ABSTRACT

---

Oscillating Wave Surge Converters (OWSCs) represent an important class of oscillating bodies wave energy converters (WECs) intended to exploit the horizontal movement of the wave fluid particles by operating in the near-shore zone. OWSCs are essentially composed by a bottom-hinged flap and a power-take off (PTO) system. The mechanical constraints imposed by the PTO system are of special importance in the study of OWSCs, due to the complex phenomena that describes the interactions between wave-flap-PTO.

The main objective of this dissertation is to develop a numerical tool able to study the hydrodynamic characteristics of wave-OWSC interaction under regular waves. The program used is ANSYS Aqwa. This program applies a mesh method based on linear wave theory and 3D radiation/diffraction theory. In this context it is essential to understand the properties of the flow. An analytical model of agitation based on potential flow theory is therefore presented.

The numerical model, previously validated by comparing the numerical results obtained with experimental data in the literature, is then applied to study the influence of the flap inertia, the regular waves and the PTO system in the hydrodynamics of the OWSC.

The results show that both the mass and the center of mass of the flap have no significant influence on the OWSC dynamics. On the other hand, the characteristics of regular waves and the PTO system significantly influence the flap dynamics and, consequently, the energy extracted by the OWSC.

**Keywords:** Wave energy, Oscillating Wave Surge Converter (OWSC), Power Take-Off (PTO), Numerical tool, ANSYS Aqwa

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>Siglas</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Enquadramento do trabalho . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	4
1.4 Metodologia . . . . .	4
1.5 Estrutura da dissertação . . . . .	4
<b>2 Estudo bibliográfico</b>	<b>7</b>
2.1 Energia das ondas . . . . .	7
2.2 Estudo numérico dos OWSCs . . . . .	8
<b>3 Modelo numérico</b>	<b>11</b>
3.1 Modelo analítico da agitação . . . . .	11
3.1.1 Equações e condições de fronteira . . . . .	11
3.1.2 Agitação regular . . . . .	13
3.1.3 Dinâmica do OWSC . . . . .	16
3.2 Programa ANSYS Aqwa . . . . .	18
3.2.1 Domínio da frequência . . . . .	19
3.2.2 Domínio do tempo . . . . .	19
3.3 Equações do modelo numérico . . . . .	21
<b>4 Validação e verificação do modelo numérico</b>	<b>25</b>
4.1 Validação de um OWSC com geometria cilíndrica . . . . .	25
4.1.1 Descrição do modelo experimental . . . . .	25
4.1.2 Comparação dos resultados . . . . .	26
4.2 Validação de um OWSC . . . . .	30

4.2.1	Descrição do modelo experimental . . . . .	30
4.2.2	Comparação dos resultados . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Resultados numéricos</b>	<b>37</b>
5.1	Caso referência e análise de dados . . . . .	37
5.2	Influência da massa/inércia . . . . .	38
5.3	Influência da altura do centro de massa . . . . .	42
5.4	Influência do período e comprimento de onda . . . . .	45
5.5	Influência do sistema PTO . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>63</b>
6.1	Conclusões . . . . .	63
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	64
	<b>Bibliografia</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Consumo de energia a nível mundial por fonte de energia, adaptado de [1]. .	2
1.2	Esquema de um <i>Oscillating Wave Surge Converter</i> (OWSC), adaptado de [4]. .	3
1.3	Metodologia para a aplicação da ferramenta numérica. . . . .	5
2.1	Distribuição média global do potencial energético da energia das ondas em KW/m, retirado de [15]. . . . .	8
3.1	Características das ondas descritas na teoria linear, adaptado de [24]. . . . .	14
3.2	Esquema da placa oscilante num canal: a) vista de planta; b) vista lateral, adaptado de [30]. . . . .	18
3.3	Esquema do funcionamento da rotina <i>Hydrodynamic Diffraction</i> , adaptado de [41]. . . . .	20
3.4	Esquema do funcionamento da rotina <i>Hydrodynamic Response</i> , adaptado de [41]. . . . .	20
3.5	Graus de liberdade e as respetivas nomenclatura de um corpo flutuante, adaptado de [43]. . . . .	21
4.1	Esquema do modelo experimental, adaptado de [44]. . . . .	26
4.2	Representação da malha utilizada na simulação. . . . .	27
4.3	Deslocamento inicial do cilindro imposto pela aplicação do momento no ANSYS Aqwa. . . . .	27
4.4	Série temporal do teste de decaimento do cilindro. . . . .	28
4.5	Séries temporais dos testes de movimento livre do cilindro. . . . .	30
4.6	Esquema da instalação experimental: (a) vista lateral; (b) vista em planta, adaptado de [9]. . . . .	31
4.7	Esquema do OWSC, adaptado de [9]. . . . .	31
4.8	Geometria simplificada da placa oscilante utilizada nas simulações. . . . .	32
4.9	Séries temporais da rotação da placa oscilante para o teste de convergência da malha. . . . .	33
4.10	Representação da Malha 3. . . . .	33
4.11	Comparação dos resultados experimentais e numéricos dos testes de validação do OWSC para os ensaios: (a) R1; (b) R2; (c) R3. . . . .	35

4.12	Comparação dos resultados experimentais e numéricos dos testes de validação do OWSC para os ensaios: (d) R4; (e) R5; (f) R6. . . . .	36
5.1	Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa ; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	40
5.2	Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	41
5.3	Influência da massa da placa oscilante na CWR. . . . .	42
5.4	Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	43
5.5	Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	44
5.6	Influência de $\bar{z}$ em CWR. . . . .	45
5.7	Variação do RAO com o período para várias alturas de onda da agitação incidente. . . . .	47
5.8	Influência da agitação regular na potência média extraída. . . . .	47
5.9	Influência da agitação na CWR. . . . .	48
5.10	Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	49
5.11	Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	50
5.12	Influência do $K_{PTO}$ na CWR. . . . .	51
5.13	Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	52
5.14	Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	53
5.15	Influência do $C_{PTO}$ na CWR. . . . .	54
5.16	Influência do $K_{PTO}$ na CWR. . . . .	55
5.17	Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	56
5.18	Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	57
5.19	Influência do sistema PTO na CWR. . . . .	58
5.20	Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	60
5.21	Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída. . . . .	61

## LISTA DE TABELAS

4.1	Características do cilindro [44]. . . . .	26
4.2	Resultados do teste de decaimento. . . . .	28
4.3	Erros obtidos no teste de decaimento. . . . .	29
4.4	Erros obtidos no teste de movimento livre. . . . .	29
4.5	Características da placa, adaptado de [9]. . . . .	31
4.6	Características das ondas consideradas para a validação da hidrodinâmica do OWSC. . . . .	32
4.7	Características das malhas consideradas. . . . .	32
4.8	Erros obtidos na validação do OWSC. . . . .	34
5.1	Características do OWSC do caso referência. . . . .	37
5.2	Características da agitação regular. . . . .	38
5.3	Massa e momentos de inércia da placa oscilante. . . . .	39
5.4	Altura do centro de massa e momentos de inércia da placa oscilante. . . . .	42
5.5	Condições da agitação ensaiadas. . . . .	46
5.6	Coefficientes de rigidez da mola para os casos considerados. . . . .	48
5.7	Coefficientes de amortecimento para os casos considerados. . . . .	51
5.8	Coefficientes de rigidez da mola para os casos considerados. . . . .	54
5.9	Coefficientes de rigidez da mola e de amortecimento para os casos considerados. . . . .	58





## SÍMBOLOS

$A_\chi$	Erro de amplitude adimensional
$a_i$	Amplitude da onda incidente
$b$	Largura do canal
$B$	Largura da placa oscilante
$c$	Celeridade de onda
$C$	Coeficiente de amortecimento
$C_{PTO}$	Coeficiente de amortecimento do sistema PTO
$c_g$	Velocidade de grupo
$\chi_i$	Magnitude do sinal
$d$	Profundidade de água no canal
$D$	Diâmetro
$\Delta S_m$	Área do painel $m$
$E$	Espessura da placa oscilante
$\eta$	Elevação da superfície livre
$f$	Frequência de onda
$F$	Força hidrodinâmica total
$f_a$	Frequência amortecida
$F_D$	Força de difração
$F_{ex}$	Força de excitação
$F_I$	Força de Froude-Krylov
$F_R$	Força de radiação
$F_H$	Força hidrostática
$\mathbf{g}$	Vetor aceleração gravítica
$G$	Função de Green
$\Gamma$	Binário de excitação complexo
$\Gamma_e$	Binário externo

## SÍMBOLOS

---

$g$	Aceleração gravítica
$H$	Altura de onda
$I$	Momento de inércia
$k$	Número de onda
$K$	Coeficiente de rigidez
$K_{PTO}$	Coeficiente elástico do sistema PTO
$L$	Comprimento de onda
$L_i$	Altura imersa
$L_T$	Altura
$m$	massa
$M_i$	Momentos externos aplicados na placa oscilante
$\mu_a$	Coeficiente de massa adicionada
$\mu_{PTO}$	Coeficiente de inércia do sistema PTO
$M_y$	Momento em torno da direção $y$
$\vec{n}$	Vetor unitário normal à superfície de um corpo rígido
$N$	Número de amostras do sinal
$N_p$	Número total de painéis sobre a área molhada de um corpo
$\nu_a$	Amortecimento de radiação
$\nu_{PTO}$	Taxa de extração de energia do sistema PTO
$\omega$	Frequência angular
$\Omega$	Domínio ou espaço de solução
$p$	Pressão
$p_0$	Pressão atmosférica
$\phi$	Potencial de velocidade
$\phi_\chi$	Erro de fase adimensional
$\phi_D$	Potencial de difração
$\phi_I$	Potencial da onda incidente
$\phi_r$	Potencial de radiação segundo o modo $j$
$\phi_R$	Potencial de radiação
$\bar{P}_{in}$	Potência média incidente
$\bar{P}_{out}$	Potência média extraída pelo OWSC
$P_{out}$	Potência instantânea extraída pelo OWSC

$\psi$	Fonte
$\rho$	Massa volúmica
$S_0$	Área molhada de um corpo
$t$	Tempo
$T$	Período de onda
$T_a$	Período amortecido
$\theta$	Ângulo de rotação da placa oscilante
$\Theta$	Amplitude de rotação complexa da placa oscilante
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular da placa oscilante
$\theta_c$	Ângulo de rotação do cilindro
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade do fluido
$\nu$	Viscosidade cinemática
$u$	Componente longitudinal da velocidade
$\vec{V}$	Vetor velocidade de um corpo rígido
$\varphi$	Campo escalar
$\vec{r}$	Vetor posição de um ponto na superfície de um corpo
$v$	Componente transversal da velocidade
$w$	Componente vertical da velocidade
$\mathbf{x}$	Sistema de coordenadas cartesiano
$x$	Coordenada longitudinal
$\mathbf{x}_g$	Coordenadas do centro de gravidade de um corpo
$\xi$	Posição da fonte
$\mathbf{x}_k$	Coordenadas do centro geométrico do painel
$y$	Coordenada transversal
$z$	Coordenada vertical



## SIGLAS

3D	<i>Tridimensional</i>
CWR	<i>Capture Width Ratio</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
OWSC	<i>Oscillating Wave Surge Converter</i>
PTO	<i>Power Take-Off</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
WAMIT	<i>Wave Analysis at Massachusetts Institute of Technology</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>



## INTRODUÇÃO

Neste capítulo, inicialmente, apresenta-se a motivação e o enquadramento do trabalho. De seguida, apresentam-se os objetivos principal e específicos e a metodologia adotada. Na parte final do capítulo descreve-se a estrutura da dissertação discriminando o teor de cada capítulo.

### 1.1 Motivação

O consumo de energia, a nível mundial, tem vindo a aumentar e prevê-se um aumento de 28% até 2040 face aos valores de 2015 (dados pelo somatório das contribuições do consumo de energia, por fonte de energia) [1]. Na Figura 1.1 apresenta-se a evolução do consumo mundial de energia, por fonte de energia, e as projeções para as próximas décadas.

Como se pode observar na Figura 1.1, grande parte da energia consumida tem origem em combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e, num futuro próximo, continuarão a ser os principais responsáveis pela produção de energia. Os processos associados à produção de energia a partir de combustíveis fósseis acarretam graves consequências ambientais, uma vez que se caracterizam pelas elevadas emissões de dióxido de carbono e outros gases que contribuem para o agravamento do efeito de estufa e consequente aumento da temperatura média global (temperatura média dos oceanos e da atmosfera terrestre).

Face ao aumento do consumo de energia esperado, não é sustentável manter o rumo previsto e é necessário inverter a tendência apresentada na Figura 1.1, ou seja, reduzir as contribuições dos combustíveis fósseis. A alternativa passa por reforçar o papel das energias renováveis e adotar novas soluções [2]. Atualmente existem algumas tecnologias bem estabelecidas no mercado, em especial no que diz respeito à energia eólica. No

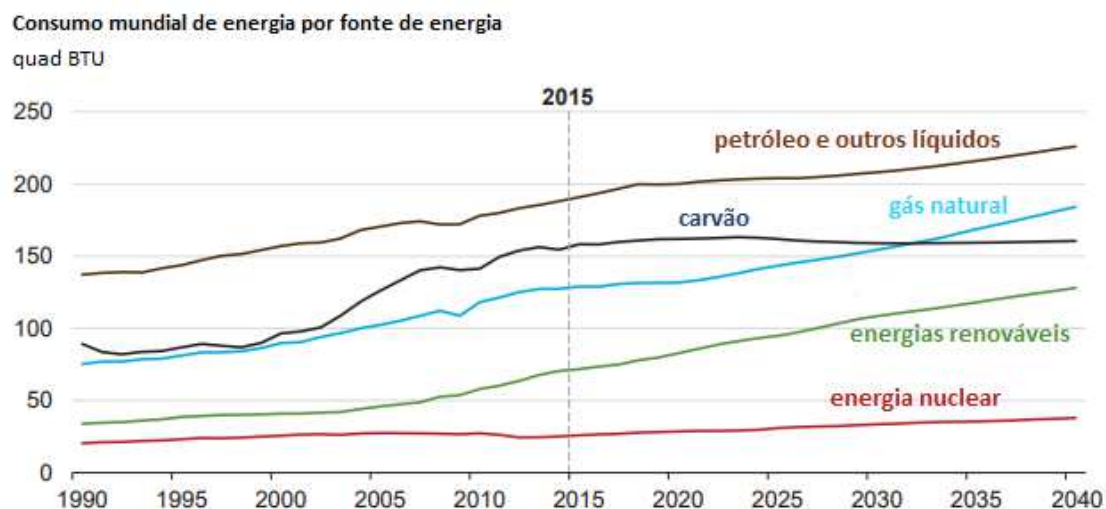


Figura 1.1: Consumo de energia a nível mundial por fonte de energia, adaptado de [1].

entanto, face ao contínuo crescimento da procura de energia não é suficiente. Torna-se necessário expandir ainda mais os conhecimentos na área das energias renováveis, e em especial, na indústria da energia das ondas devido ao elevado potencial energético disponível (ver Secção 2.1) [3].

## 1.2 Enquadramento do trabalho

Embora se tenha de recuar mais de dois séculos para se encontrar as primeiras patentes relacionadas com tecnologias de conversão de energia das ondas [4], foi na década de setenta que, com o choque petrolífero, surgiu um maior interesse e financiamento para o desenvolvimento deste tipo de tecnologias. Atualmente, existem inúmeros projetos e em diferentes fases de desenvolvimento de dispositivos para o aproveitamento da energia das ondas (WECs - *Wave Energy Converters*) [5].

No final da década de setenta, a grande maioria dos WECs foram concebidos para operarem em zonas de grandes profundidades, isto é, afastados da costa (*offshore*), devido ao elevado potencial energético disponível [6]. Estes WECs acarretam de grandes custos de instalação e manutenção em comparação com os WECs que operam perto da costa (*nearshore*) [7], uma vez que perto da costa são filtrados os extremos estados do mar devido, essencialmente, à dissipação de energia provocada pela fricção no fundo do mar e pela rebentação das ondas [8].

Em alternativa, no início do século XXI começaram a surgir outras tecnologias mais viáveis, tanto a nível operacional como financeiro [5].

O desenvolvimento, desde a fase conceptual à fase de comercialização dos WECs, é, em geral, um processo bastante demorado e que requer custos muito elevados [5]. Em particular, os custos associados à investigação, construção, implementação, manutenção e teste dos protótipos, constituem as principais barreiras ao desenvolvimento dos WECs



[5]. Neste contexto, foi no campo teórico que se verificaram os maiores progressos, tendo os modelos numéricos ganho especial relevância.

Os métodos numéricos são uma importante ferramenta no aperfeiçoamento e otimização de projetos de WECs face aos reduzidos custos que apresentam, em comparação com os modelos físicos. Podem ser aplicados para caracterizar a hidrodinâmica dos WECs e permitem testar diferentes configurações geométricas bem como diferentes condições da agitação incidente, sem custos adicionais elevados [9].

Nesta dissertação pretende-se estudar numericamente um WEC do tipo *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC). O OWSC consiste numa placa oscilante, articulada a um eixo que se encontra junto ao fundo do mar e que apresenta um movimento rotacional provocado pelas forças hidrodinâmicas [10]. A placa encontra-se acoplada a um sistema de extração energia (PTO - *Power Take-Off*). Tipicamente, o sistema PTO é composto por um ou mais cilindros hidráulicos que funcionam como bombas para transportar um fluido, por meio de um circuito hidráulico fechado, a uma central hidroelétrica. Este dispositivo visa explorar o movimento horizontal das partículas de fluido devido às ondas [11] e como tal opera em zonas costeiras com profundidades pequenas e intermédias [12, 13], onde as partículas da água se movimentam essencialmente em avanço-recuo [14]. Na Figura 1.2 apresenta-se um esquema de um OWSC.

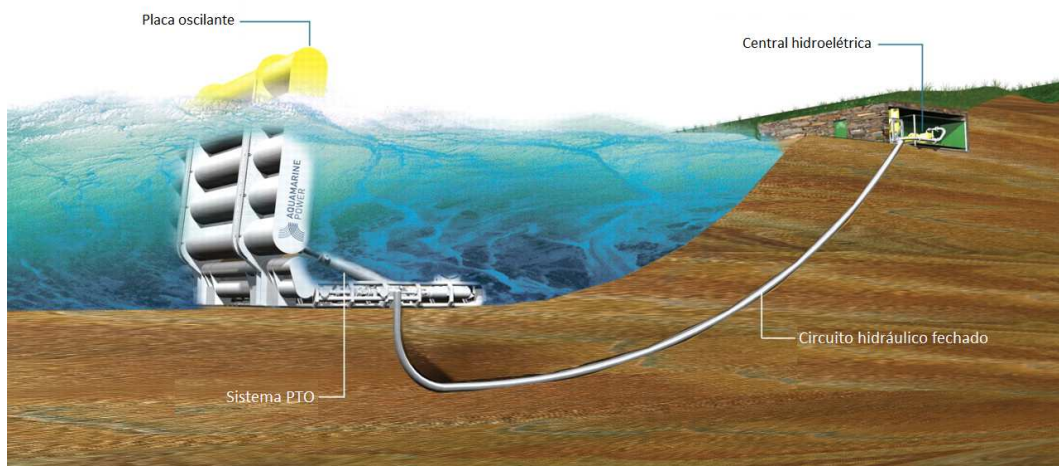


Figura 1.2: Esquema de um *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC), adaptado de [4].

Na literatura, existem diversos trabalhos referentes à modelação numérica de OWSCs, mas dada a complexidade das interações ondas-placa oscilante-sistema PTO e das limitações numéricas, muitos dos modelos numéricos desprezam os efeitos não lineares provocados pelas restrições mecânicas do PTO [9]. Esta dissertação foca-se, portanto, no desenvolvimento de uma ferramenta numérica capaz de lidar com as restrições mecânicas.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é estudar numericamente as características hidrodinâmicas da interação onda-OWSC em agitação regular. As simulações numéricas serão realizadas usando o modelo ANSYS Aqwa.

Os objetivos específicos são:

- i) Validar o modelo numérico usando os dados experimentais existentes na literatura;
- ii) Implementar as características do sistema de extração de energia;
- iii) Analisar a influência das características (nomeadamente a massa e a altura do centro de massa) do OWSC, da agitação regular e efeitos do PTO.

### 1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos na Secção 1.3 adotou-se um conjunto de procedimentos.

Inicialmente, é necessário compreender as principais características do escoamento e a dinâmica do OWSC. De seguida, procede-se à aplicação do modelo ANSYS Aqwa para analisar a influência de diferentes parâmetros na hidrodinâmica do OWSC. Neste contexto, começa-se por validar o ANSYS Aqwa, realizando um conjunto de simulações e compara-se os resultados com dados existentes na literatura. Após a validação, procede-se à análise dos parâmetros que têm influência na hidrodinâmica do OWSC. A resposta do dispositivo é estudada recorrendo a códigos desenvolvidos em MatLab. Na Figura 1.3 apresenta-se um esquema que ilustra a metodologia adotada para a aplicação do ANSYS Aqwa.

### 1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos: Introdução, Estudo bibliográfico, Modelo numérico, Validação e verificação do modelo numérico, Resultados numéricos e Conclusões e trabalhos futuros. Serve o presente capítulo, **Introdução**, para descrever a motivação, o enquadramento do problema, os objetivos e a metodologia para estudar a resposta dinâmica do OWSC.

No segundo capítulo, **Estudo bibliográfico**, descreve-se o funcionamento, as principais componentes e a dinâmica do OWSC. Apresenta-se a caracterização da agitação marítima e o formalismo matemático para descrever este fenómeno: teoria de Airy e teoria de 2ª ordem de Stokes para agitação regular. Por fim, apresentam-se alguns estudos numéricos realizados por diferentes autores aplicados ao dispositivo.

No terceiro capítulo, **Modelo numérico**, descreve-se o programa ANSYS Aqwa e apresentam-se as equações do modelo.

No quarto capítulo, **Validação e verificação do modelo numérico**, definem-se e calibram-se os parâmetros numéricos e comparam-se os resultados obtidos com estudos existentes na literatura.

No quinto capítulo, **Resultados numéricos**, apresenta-se uma análise numérica da influência de diferentes parâmetros na hidrodinâmica do OWSC.

No sexto capítulo, **Conclusões e trabalhos futuros**, formulam-se as devidas conclusões e apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros.

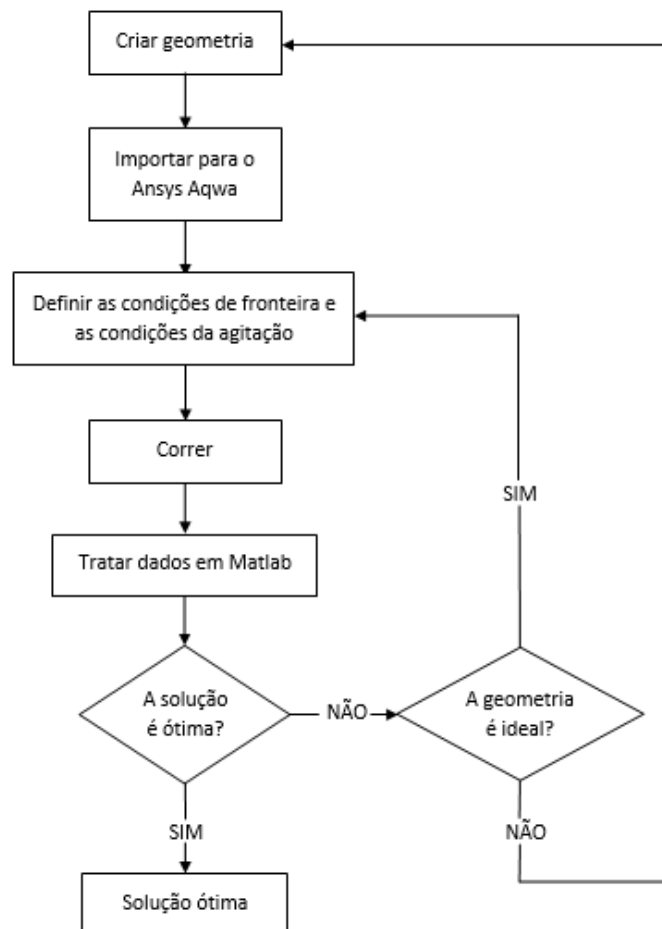


Figura 1.3: Metodologia para a aplicação da ferramenta numérica.



## ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo, inicialmente, descreve-se o recurso da energia das ondas e a sua distribuição global. Na parte final do capítulo apresentam-se alguns estudos numéricos realizados por outros autores com relevância para este estudo.

### 2.1 Energia das ondas

A avaliação do recurso da energia das ondas e, em especial, da sua distribuição global do potencial energético é um requisito fundamental para projetar adequadamente os dispositivos de aproveitamento de energia das ondas (WECs). A sua utilização depende ainda da disponibilidade, do acesso e das características da agitação. Na Figura 2.1 apresenta-se a distribuição da potência média global em KW/m, onde é possível observar que no hemisfério norte os locais mais energéticos encontram-se ao largo da costa ocidental do Reino Unido, devido ao clima tempestuoso característico dessa região [15], e na costa banhada pelo oceano Pacífico dos Estados Unidos e Canadá [16]. No hemisfério sul, destacam-se a região sul do Chile e toda a costa ocidental da Austrália e Nova Zelândia. Embora a Figura 2.1 sugira, em termos do potencial energético médio disponível, a existência de inúmeros locais adequados para a implementação de WECs, o principal desafio para a escolha das melhores regiões prende-se também com a necessidade de garantir condições que permitam uma operação contínua e eficiente dos WECs [16]. Portanto, a escolha do tipo de dispositivo vai estar fortemente ligada às condições de agitação e localização. A proximidade à costa aliada à profundidade da água são alguns fatores a ter em conta, uma vez que têm influência, por exemplo, nos custos associados às operações de manutenção.

De forma a provar que a energia das ondas é uma alternativa viável dentro das energias renováveis é necessário demonstrar a sua sustentabilidade económica. A forma de garantir o seu futuro, passa por aumentar a consciencialização pública do seu potencial enquanto

fonte sustentável de exploração de energia [17]. Para tal é necessário fazer-se um balanço dos impactos ambientais, sociais e económicos.

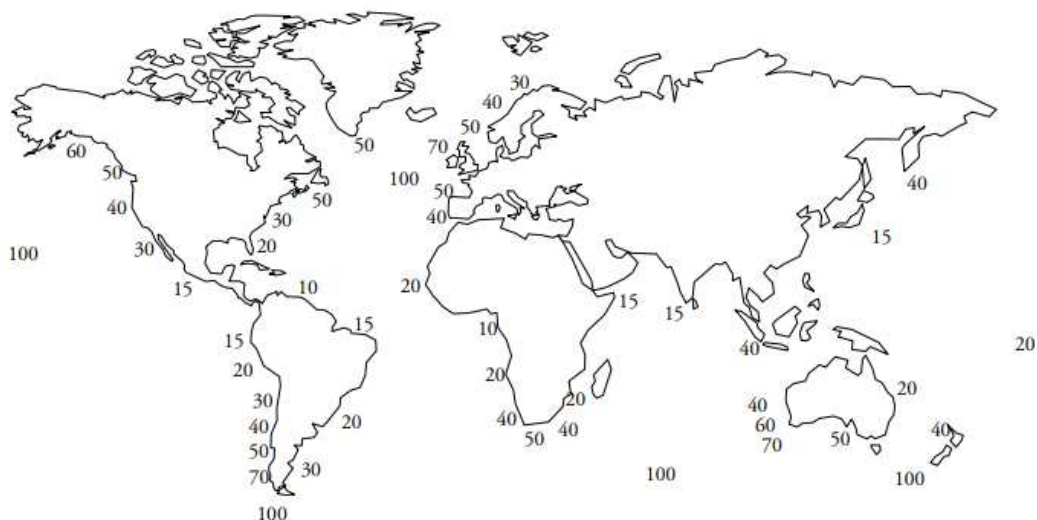


Figura 2.1: Distribuição média global do potencial energético da energia das ondas em KW/m, retirado de [15].

Como qualquer outra fonte de energia, a exploração da energia das ondas apresenta, inevitavelmente, impactos no ambiente, positivos e negativos [16]. Nesse contexto, estudos sobre os impactos ambientais têm sido realizados, de modo a identificar os principais problemas e potenciais soluções. Das conclusões apresentadas, destaca-se a não emissão de gases que contribuem para o agravamento do efeito de estufa, pelos WECs em fase de operação, o que contribui para a mitigação das alterações climáticas [16]. Por outro lado, a perturbação dos habitats subaquáticos provocada pelo ruído subaquático resultante dos processos de instalação de dispositivos, tanto flutuantes como emersos, ou o ruído produzido pelos navios em processos de manutenção de WECs, essencialmente em *offshore*, pode levar à migração de espécies comprometendo os ecossistemas locais [18]. É então necessário garantir um balanço positivo entre os impactos ambientais e apresentar, previamente, soluções para prevenir eventuais problemas que possam surgir com a implementação de WECs.

Relativamente aos aspetos socioeconómicos, o principal ponto a salientar relaciona-se com o enorme potencial que a indústria da energia das ondas apresenta para a criação de emprego. Não só estimula a criação de postos de trabalho diretos, resultantes da exploração in loco do recurso, como também postos indiretos, associados, por exemplo, à necessidade de desenvolvimento, construção e montagem dos WECs.

## 2.2 Estudo numérico dos OWSCs

Nesta secção apresentam-se alguns estudos numéricos realizados por outros autores da hidrodinâmica dos OWSCs.

Tradicionalmente, a modelação numérica de OWSCs é feita recorrendo a códigos que se baseiam nos métodos de malha [9]. Este método baseia-se no volume finito que consiste em dividir o domínio da solução num número finito de volumes de controlo adjacentes uns aos outros [32]. Os valores das variáveis são calculados para o centroide de cada volume de controlo e por interpolação podem ser calculados os valores das variáveis na superfície dos volumes de controlo [32]. A malha define as fronteiras do volume de controlo [32]. O primeiro estudo numérico do OWSC foi desenvolvido por [33]. Os resultados demonstraram que embora a elevação da superfície livre tenha sido devidamente simulada, o movimento da placa oscilante não foi validado.

Mais recentemente, em 2012, estudou-se a dinâmica de um OWSC incorporando componentes estruturais, hidrodinâmicos e do sistema PTO [34]. Embora tenham tido em conta efeitos importantes como a radiação ou difração das ondas, os efeitos não-lineares da viscosidade e da interação onda-estrutura não foram considerados [9].

No mesmo ano, sugeriu-se que é possível obter uma boa concordância entre resultados numéricos e experimentais [10]. Estes resultados foram obtidos com recurso ao código OpenFOAM, que incorpora os efeitos não-lineares da viscosidade.

Em alternativa aos métodos de malha têm-se desenvolvido os métodos sem malha. Entre os métodos sem malha, destaca-se o método SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*). Este método baseia-se na formulação Lagrangiana para resolver as equações de Navier-Stokes. Por exemplo, utilizou-se este método para estudar as características hidrodinâmicas de um OWSC e os efeitos que a distância entre o centro de rotação da placa e a superfície livre, a altura das ondas incidentes e o coeficiente de amortecimento do sistema PTO influenciam a potência extraída [35]. Os resultados obtidos demonstraram uma boa concordância com os resultados experimentais permitindo concluir que o método permite simular com sucesso a hidrodinâmica de OWSCs.

O método SPH foi também aplicado com sucesso para simular a dinâmica de um OWSC [36]. Diferentes restrições não-lineares foram consideradas de modo a estudar numericamente o efeito do sistema PTO. Os resultados numéricos do ângulo de rotação da placa oscilante apresentaram boa concordância com os experimentais.

Embora os métodos apresentados anteriormente (com e sem malha) sejam capazes de lidar com escoamentos não-lineares e com grandes deformações da superfície livre [37], dado ao elevado esforço computacional para determinar os campos de pressão e de velocidade das interações fluido-estrutura, não são os mais adequados para estudar todo o espectro de resposta dos OWSCs [27]. Neste contexto, aplicam-se métodos potenciais para estudar a hidrodinâmica dos OWSCs. Por exemplo, estudou-se numericamente, com sucesso, a hidrodinâmica e a potência extraída de uma placa oscilante sujeita a agitação regular e irregular utilizando um método potencial [38]. Com recurso ao código WAMIT, que aplica o método dos painéis 3D baseado na teoria linear das ondas e na teoria da radiação/difração em 3D, desenvolveram-se dois modelos distintos, um linear e outro não-linear. O modelo linear foi utilizado para testar o efeito de diferentes configurações geométricas e de diferentes sistemas PTO na potência extraída. O modelo não-linear foi

desenvolvido para estudar a viscosidade e outros efeitos não-lineares.



## MODELO NUMÉRICO

Neste capítulo, inicialmente, procede-se à caracterização da agitação marítima apresentando-se os conceitos fundamentais da teoria de Airy e da teoria de 2ª ordem de Stokes para agitação regular. De seguida, descreve-se o funcionamento e a dinâmica do OWSC. Por fim, apresentam-se as principais características do programa ANSYS Aqwa, descrevem-se as equações base do modelo numérico e as suas principais rotinas.

### 3.1 Modelo analítico da agitação

#### 3.1.1 Equações e condições de fronteira

De modo a estudar analiticamente as propriedades cinemáticas das ondas é necessário conhecer as equações que governam este tipo de escoamento. As hipóteses simplificativas neste tipo de escoamento são: fluido newtoniano, homogéneo e incompressível. O escoamento é governado pela equação da continuidade, que expressa a conservação da massa, e pela equação de Navier-Stokes, que expressa o balanço da quantidade de movimento. As equações podem ser dadas, respetivamente, por [19]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla g z \quad (3.2)$$

onde  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  é o vetor velocidade do fluido,  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  é o sistema de coordenadas Cartesiano,  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $p(\mathbf{x}, t)$  é a pressão,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\mathbf{g}$  é a aceleração gravítica. Considerando que o fluido é invíscido, a Equação (3.2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla g z \quad (3.3)$$

Considere-se o escoamento irrotacional, isto é:

$$\nabla \times \mathbf{u} = 0 \quad (3.4)$$

Desta forma, pode ser definido um potencial de velocidade,  $\phi(\mathbf{x}, t)$ , onde o vetor velocidade do fluido é representado pelo gradiente do potencial:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \nabla \phi(\mathbf{x}, t) \quad (3.5)$$

Combinando as Equações (3.1) e (3.5) resulta a Equação de Laplace [20, 21]:

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2 \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial z^2} = 0 \quad (3.6)$$

A introdução do formalismo matemático típico dos problemas de valores de fronteira permite estudar o escoamento em torno da placa oscilante (componente constituinte do OWSC). Numa região limitada por uma fronteira a conservação da massa tem de ser verificada juntamente com as condições que se estabelecem sobre a fronteira. Considere-se que a fronteira da placa se desloca à velocidade  $\vec{V}$  e  $\vec{n}$  representa um vetor unitário normal à superfície. A velocidade da fronteira é dada por  $(\vec{V} \cdot \vec{n})\vec{n}$ .

Admitindo que a superfície da placa oscilante é impermeável, a componente normal da velocidade de uma partícula de fluido, à superfície da placa  $(\vec{v} \cdot \vec{n})\vec{n}$ , tem de ser igual à velocidade da própria superfície:

$$(\vec{V} \cdot \vec{n})\vec{n} = (\vec{v} \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (3.7)$$

Desta forma, e respeitando a Equação (3.5), na superfície da placa:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{V} \cdot \vec{n} \quad (3.8)$$

Considere-se um plano  $z = 0$  que coincide com a superfície livre e o eixo  $z$  a apontar para cima onde  $d$  é a distância entre a superfície livre e o fundo do mar (ver Figura 3.1). Assumindo o fundo do mar plano, horizontal e impermeável, a velocidade na direção normal é nula:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad z = -d \quad (3.9)$$

Relativamente à superfície livre, para uma onda que se desloca segundo o sentido positivo do eixo  $x$ , a elevação da superfície livre,  $\eta$ , tem de ser acompanhada pelo movimento do fluido com  $z = \eta(x, y, t)$ . Sobre a superfície livre são aplicadas duas condições de fronteira. A primeira condição denomina-se condição dinâmica de superfície livre e afirma que a pressão sobre a superfície livre é constante e igual à pressão atmosférica,

$p_0$ . A segunda condição denomina-se condição cinemática de superfície livre e afirma que qualquer partícula pertencente à superfície livre num determinado instante faz parte desta mesma superfície num instante posterior.

A condição dinâmica de superfície livre resulta da integração da Equação (3.3) sobre a superfície livre:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p_0}{\rho} + gz = c(t), \quad z = \eta \quad (3.10)$$

onde  $c(t)$  é uma função arbitrária que depende apenas do tempo e que é nula se a cota média da superfície livre não se alterar. A Equação (3.10) designa-se de equação de Bernoulli na superfície livre.

A condição cinemática de superfície livre resulta da derivada material da função  $z = \eta(x, y, t)$ . A derivada material de um campo escalar,  $\varphi(\mathbf{x}, t)$ , é dada por:

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (3.11)$$

onde  $u, v$  e  $w$  são, respetivamente, as componentes da velocidade do escoamento segundo as direções  $(x, y, z)$ .

Aplicando a Equação (3.11) à função  $z = \eta(x, y, t)$ , resulta:

$$\frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (3.12)$$

Nas hipóteses de escoamento potencial, ou seja, fluido invíscido e incompressível e escoamento irrotacional, toma a forma:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad z = \eta \quad (3.13)$$

O problema de valores de fronteira fica assim definido pelas Equações (3.6), (3.9), (3.10) e (3.13). A dificuldade na obtenção de uma solução geral deve-se à não linearidade das Equações (3.10) e (3.13) e ao facto destas equações serem escritas para a superfície livre que é também uma incógnita do problema.

### 3.1.2 Agitação regular

Nesta secção, apresentam-se os conceitos mais importantes da teoria linear das ondas (teoria de Airy) e da teoria de 2ª ordem de Stokes. Apresentam-se apenas estas teorias, uma vez que são as teorias disponíveis no programa ANSYS Aqwa. A teoria aqui apresentada encontra-se referenciada em [22].

#### 3.1.2.1 Teoria de Airy

A teoria de Airy, também denominada como teoria linear das ondas, foi proposta por George Airy, no século XIX, e consiste no primeiro e mais simples modelo matemático

de representação de ondas [23]. Na teoria linear, além dos pressupostos considerados anteriormente (fluido homogêneo, incompressível e invíscido e escoamento irrotacional), admite-se ainda que a altura de onda,  $H$ , é constante e pequena em comparação com o seu comprimento,  $L$ , e com a profundidade,  $d$ . Esta teoria, baseia-se na linearização e resolução das equações do problema de valores de fronteira definidas na secção 3.1.1.

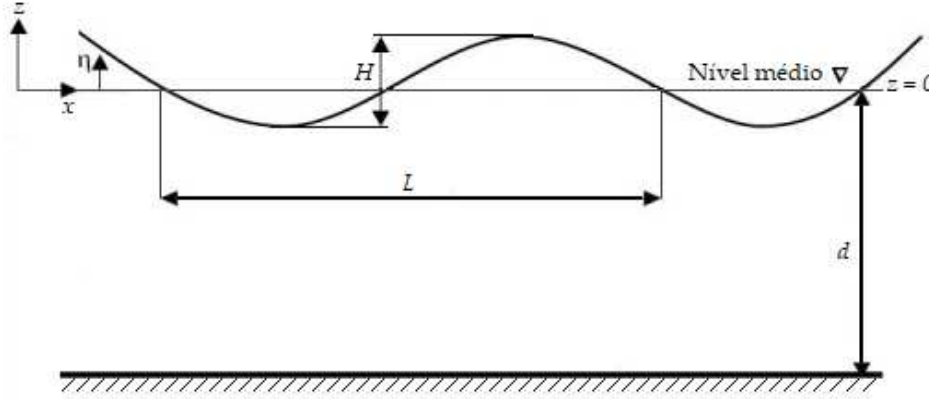


Figura 3.1: Características das ondas descritas na teoria linear, adaptado de [24].

A hipótese de ondas de pequena amplitude, isto é,  $H/d \ll 1$ , permite linearizar as Equações (3.10) e (3.13). A condição dinâmica de superfície livre e a condição cinemática de superfície livre podem ser reescritas, respetivamente, da seguinte forma:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{z=0} + g\eta = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3.15)$$

Combinando as Equações (3.14) e (3.15), obtém-se a condição de Cauchy-Poisson:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \bigg|_{z=0} = 0 \quad (3.16)$$

A partir da linearização das condições de fronteira e da solução exata da equação de Laplace, obtém-se a expressão que representa o potencial de velocidade da teoria linear [25]:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.17)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular e  $k$  é o número de onda, dados, respetivamente, por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.18)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.19)$$

onde  $T$  é o período de onda.

A relação entre o comprimento de onda e o período é expressa pela relação de dispersão. A relação de dispersão satisfaz a condição de Cauchy-Poisson, Equação (3.16), e é dada por:

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (3.20)$$

A celeridade da onda,  $c$ , é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (3.21)$$

A Equação (3.21) permite mostrar que ondas com diferentes comprimentos de onda têm diferentes velocidades de propagação, ou seja, o meio é disperso.

A expressão que permite obter a elevação da superfície livre é dada por:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.22)$$

Os campos de velocidade e pressão no fluido podem ser calculados derivando as equações do potencial de velocidade. Derivando a Equação (3.17) em ordem às direções  $x$  e  $z$ , obtém-se, respetivamente, as componentes horizontal e vertical da velocidade:

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi(x, z, t)}{\partial x} = -\frac{H g k}{2 \omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (3.23)$$

$$w(x, z, t) = \frac{\partial \phi(x, z, t)}{\partial z} = -\frac{H g k}{2 \omega} \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.24)$$

O campo de pressão é dado, a partir da Equação (3.14), por:

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (3.25)$$

A aplicabilidade da teoria linear das ondas não se restringe ao estudo de casos em profundidades intermédias ou infinitas, no entanto é nestas condições, isto é,  $d/L > 0.5$ , onde a teoria apresenta os melhores resultados.

### 3.1.2.2 Teoria de 2ª ordem de Stokes

Quando os efeitos não lineares, derivados da interação da onda com o fundo ganham relevância, a forma das ondas e o campo de velocidade alteram-se significativamente. Portanto, torna-se necessário recorrer a teorias mais complexas, como é o caso da teoria de 2ª ordem de Stokes para descrever a elevação da superfície livre e o campo de escoamento. Os efeitos não lineares manifestam-se de diferentes formas e podem ser devido aos efeitos viscosos, à rotação do escoamento e à turbulência. Estes efeitos são relevantes para  $H/L < 0.125$  justificando assim a aplicação da teoria de 2ª ordem de Stokes. As equações do problema de valores de fronteira são as mesmas da teoria potencial, isto é, Equações (3.6), (3.9), (3.10) e (3.13). A técnica utilizada para a resolução das equações pressupõe que as variáveis podem ser desenvolvidas em série de potências. As soluções dimensionais de primeira ordem correspondem à teoria linear e as de segunda ordem correspondem à teoria de Stokes de ordem 2. Neste contexto o potencial de velocidade é dado por [26]:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) - \frac{3\omega H^2}{32} \frac{\cosh[2k(d+z)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (3.26)$$

A elevação da superfície livre pode ser expressa da seguinte forma [26]:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{kH^2}{16} \left[ \frac{\cosh(kd)[2 + \cosh(2kd)]}{\sinh^3(kd)} \right] \cos[2(kx - \omega t)] \quad (3.27)$$

Derivando a Equação (3.26) em ordem às direções  $x$  e  $z$ , obtém-se as componentes horizontal e vertical da velocidade, respetivamente:

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi(x, z, t)}{\partial x} = -\frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3(\pi H)^2}{4TL} \frac{\cosh[2k(d+z)]}{\sinh^4(kd)} \cos[2(kx - \omega t)] \quad (3.28)$$

$$w(x, z, t) = \frac{\partial \phi(x, z, t)}{\partial z} = -\frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3(\pi H)^2}{4TL} \frac{\sinh[2k(d+z)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (3.29)$$

Note-se que a relação de dispersão permanece inalterável para a teoria de segunda ordem (ver Equação (3.20)).

### 3.1.3 Dinâmica do OWSC

O OWSC consiste numa placa oscilante flutuante articulada num eixo horizontal, junto ao fundo do mar e um sistema PTO. Do ponto de vista da dinâmica, o OWSC tem apenas

um grau de liberdade, pelo que interessa estudar o momento total e a inércia do OWSC relativa ao eixo de rotação [27]. Na Figura 3.2 apresenta-se o esquema de um OWSC com as variáveis que permitem caracterizar o sistema.

Os efeitos não-lineares resultantes das interações ondas-placa oscilante-PTO conferem ao estudo da hidrodinâmica do OWSC uma dificuldade acrescida. Uma das principais dificuldades no estudo dos OWSCs relaciona-se com os sistemas PTO, em virtude da complexidade destes mecanismos. Muitas das vezes, a modelação dos sistemas PTO é feita recorrendo a modelos de forças que servem para representar a sua ação externa [28]. No entanto, estes modelos são geralmente simplificados e certos fatores, como as perdas por fricção são normalmente desprezados [28]. A obtenção das soluções analíticas para a dinâmica do OWSC torna-se assim muito complicada.

Do ponto de vista analítico, o movimento da placa oscilante assemelha-se ao movimento de um pêndulo invertido [29], e o seu movimento é descrito pelo equilíbrio de momentos em torno do eixo de rotação:

$$I\ddot{\theta} = \sum_i M_i = \Gamma_e \quad (3.30)$$

onde  $I$  é o momento de inércia relativo ao eixo de rotação,  $\ddot{\theta}$  é a aceleração angular,  $M_i$  são os momentos externos aplicados na placa e  $\Gamma_e$  é a respetiva soma dos momentos externos.

Seguindo [30], considere-se as seguintes variáveis adimensionais no estudo de um sistema deste tipo colocado num canal (ver Figura 3.2):

$$t' = \sqrt{\frac{g}{b}} t \quad (3.31)$$

$$\theta' = \frac{b}{a_i} \theta \quad (3.32)$$

onde  $b$  é a largura do canal,  $\theta$  é o ângulo de rotação da placa em torno do eixo de rotação e  $a_i$  é a amplitude da onda incidente. Nesta secção considera-se que o apóstrofe nas variáveis indicam uma quantidade física adimensional.

Assumindo que o sistema PTO é composto por uma mola, que representa os efeitos elásticos, e um amortecedor, que representa os efeitos dissipativos, com características lineares a Equação (3.30) pode ser escrita da seguinte forma [31]:

$$I'\ddot{\theta}'(t') + C'\dot{\theta}'(t') + K'\theta'(t') = \Gamma_e'(t') \quad (3.33)$$

onde  $I' = I/(\rho b^5)$  é o momento de inércia adimensional relativo ao eixo de rotação,  $C'$  e  $K'$  são, respetivamente, os coeficientes de amortecimento e rigidez,  $\dot{\theta}'$  é a velocidade angular adimensional da placa e  $\Gamma_e' = \Gamma_e/(\rho g b^4)$  é soma adimensional dos momentos externos aplicados na placa.

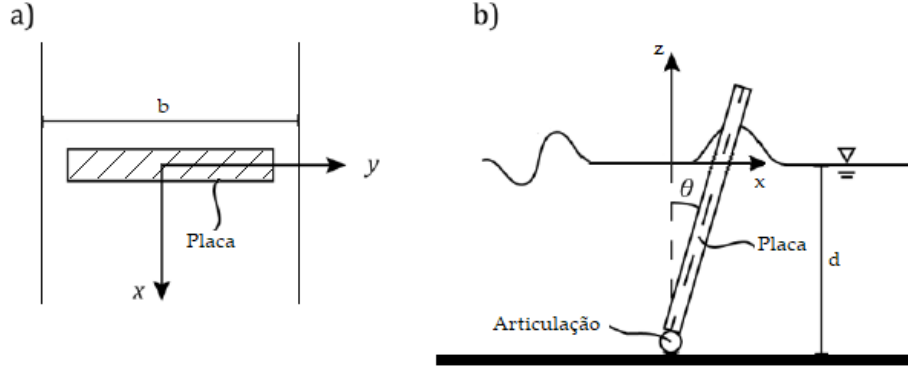


Figura 3.2: Esquema da placa oscilante num canal: a) vista de planta; b) vista lateral, adaptado de [30].

Sem perda de generalidade, assume-se que  $\Gamma'_e$  depende do tempo via  $\theta(t)$ , podendo ser dado por [19]:

$$\Gamma'_e(t') = -\mu'_{PTO}\ddot{\theta}'(t') - \nu'_{PTO}\dot{\theta}'(t') - K'_{PTO}\theta'(t') \quad (3.34)$$

onde  $\mu'_{PTO}$  e  $K'_{PTO}$  são, respetivamente, as características da inércia e elástica do sistema PTO e  $\nu'_{PTO}$  é a taxa de extração de energia.

Reescrevendo no domínio da frequência, a equação do movimento da placa é dada por:

$$\left[ -\omega'^2 (I' + \mu'_a + \mu'_{PTO}) + K' + K'_{PTO} - i\omega' (\nu'_a + \nu'_{PTO}) \right] \Theta' = \Gamma' \quad (3.35)$$

onde  $\mu'_a = \mu_a/(\rho b^5)$  é a massa adicionada adimensional,  $\nu'_a = \nu_a/(\rho b^5)$  é o amortecimento adimensional resultante da radiação das ondas,  $\Gamma'$  é o binário de excitação complexo que corresponde à ação das ondas incidentes na placa oscilante e  $\Theta'$  é a amplitude de rotação complexa da placa. As variáveis  $\mu'_a$ ,  $\nu'_a$  e  $\Gamma'$  dependem das soluções dos problemas de radiação/difração das ondas e, consequentemente, da frequência.

Na Secção 3.3, apresenta-se com mais detalhe os conceitos de massa adicionada, coeficiente de amortecimento, força de excitação e o problema de radiação/difração das ondas.

### 3.2 Programa ANSYS Aqwa

ANSYS Aqwa é um programa comercial que fornece um conjunto de ferramentas capazes de analisar o efeito das ondas, do vento e da corrente em estruturas flutuantes ou fixas, tais como navios, plataformas *offshore* ou WECs [39]. Este programa baseia-se no método



dos painéis 3D para analisar o comportamento hidrodinâmico de estruturas sujeitas à agitação marítima. De acordo com este método, a superfície da estrutura é dividida num número finito de painéis [40]. Para calcular os esforços hidrodinâmicos, o programa aplica a teoria potencial, onde assume que o fluido é ideal e aplica a teoria linear, apresentada na secção 3.1.

O ANSYS Aqwa encontra-se dividido em duas partes principais: *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response*. A primeira parte é essencialmente utilizada para calcular os principais parâmetros hidrodinâmicos, no domínio da frequência, nomeadamente os coeficientes hidrodinâmicos: força de excitação, coeficiente de massa adicionada e coeficiente de amortecimento a partir da teoria da radiação/difração em 3D. A segunda parte permite descrever o movimento do corpo, sujeito à agitação regular ou irregular no domínio do tempo.

### 3.2.1 Domínio da frequência

Para o ANSYS Aqwa calcular os coeficientes hidrodinâmicos no domínio da frequência é necessário fornecer um conjunto de dados de entrada. Estes dados encontram-se divididos em dois grupos: a estrutura (OWSC) e a agitação marítima. Relativamente ao OWSC é necessário definir a sua geometria. Isso pode ser feito num programa de modelação geométrica, como SolidWorks, e ser posteriormente importado para o ANSYS Aqwa ou pode ser feito diretamente no programa. É ainda necessário indicar a massa e os momentos de inércia do dispositivo. Definidas as características geométricas é necessário gerar a malha. Relativamente à agitação é necessário fornecer as dimensões do domínio e definir o número de direções de onda e o número de frequências a analisar.

Uma vez introduzidos estes dados, o programa determina a função potencial e os campos de pressão e velocidade e os coeficientes hidrodinâmicos. Na Figura 3.3, apresenta-se um esquema do funcionamento desta rotina do programa.

### 3.2.2 Domínio do tempo

Após a obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos, no domínio da frequência, pretende-se conhecer a resposta do dispositivo no domínio do tempo para cada condição de agitação. A parte *Hydrodynamic Response* permite fazer essa conversão.

Para isso, o programa necessita de conhecer as características da agitação. No caso de agitação regular é necessário introduzir o período, a altura e a direção de propagação da onda incidente. Uma vez que o ANSYS Aqwa não consegue simular a rebentação das ondas, o declive das ondas incidentes tem de ser inferior a 1/7. Além disso, é possível introduzir forças externas que estejam aplicadas no dispositivo e ainda as características do vento ou das correntes marítimas caso existam. Por fim, é necessário definir o passo de tempo da simulação.

Na Figura 3.4 apresenta-se um esquema do funcionamento da rotina *Hydrodynamic Response*.

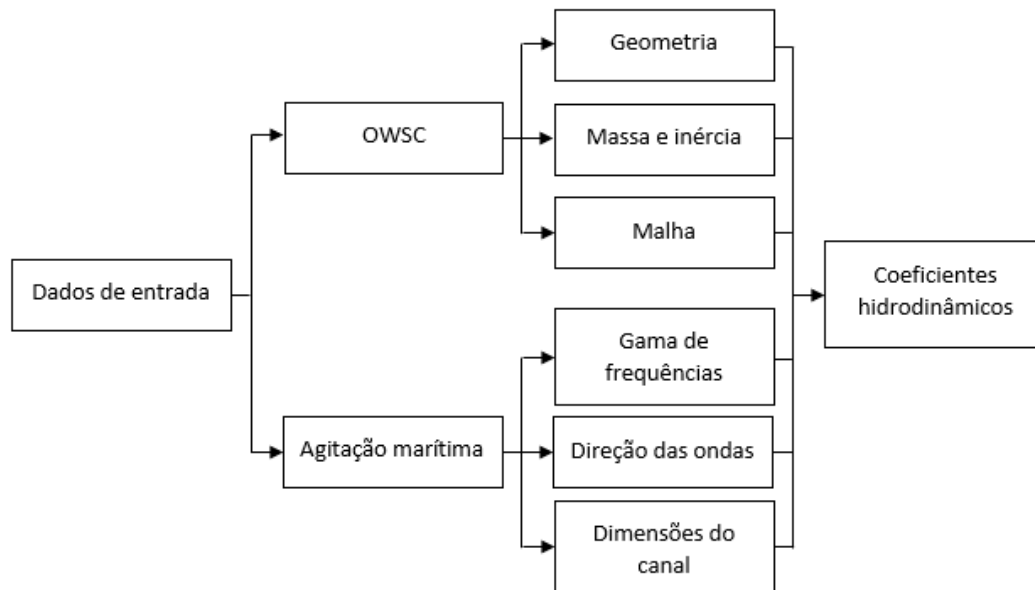


Figura 3.3: Esquema do funcionamento da rotina *Hydrodynamic Diffraction*, adaptado de [41].

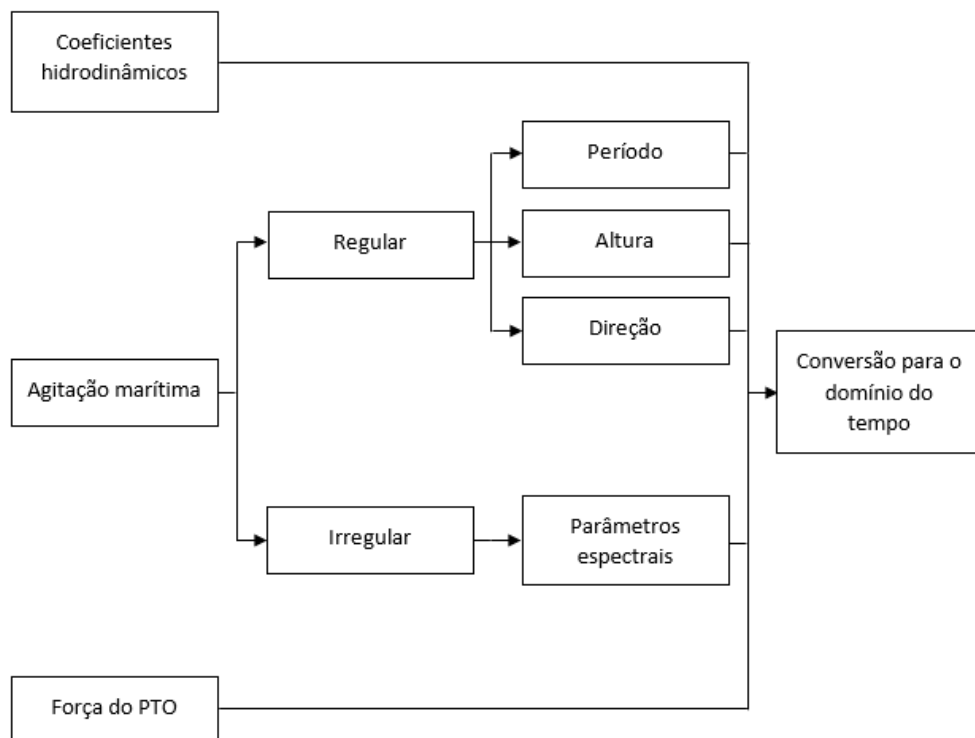


Figura 3.4: Esquema do funcionamento da rotina *Hydrodynamic Response*, adaptado de [41].

### 3.3 Equações do modelo numérico

A teoria apresentada nesta secção encontra-se referenciada em [23], [42] e [40].

Como descrito no Capítulo 2, o vetor velocidade é calculado através do gradiente do potencial [42]. As características lineares do esquema numérico permitem a aplicação do princípio da sobreposição e assim o estudo de estados de agitação complexos.

O potencial de velocidade conta com o contributo de três componentes: a radiação de ondas provocada pelo movimento de um corpo, o campo das ondas incidentes e o campo das ondas difratadas [40]. Resultam, assim, três componentes distintos:

- O potencial da radiação, que traduz a radiação de ondas por um corpo com um movimento harmónico num fluido em repouso [40]. As forças que daí resultam podem ser calculadas recorrendo aos conceitos de massa adicionada e coeficiente de amortecimento [40].
- O potencial da onda incidente, dado pela teoria de Airy ou pela teoria de 2ª ordem de Stokes (corresponde à excitação e é conhecido).
- O potencial da difração, que traduz a transformação das ondas quando incidem num corpo imóvel [40]. As forças resultantes podem ser decompostas em duas componentes: força de difração e força de Froude-Krylov [40].

Adotando a notação convencional, apresenta-se na Figura 3.5 os seis graus de liberdade e a nomenclatura naval utilizada para um corpo flutuante.

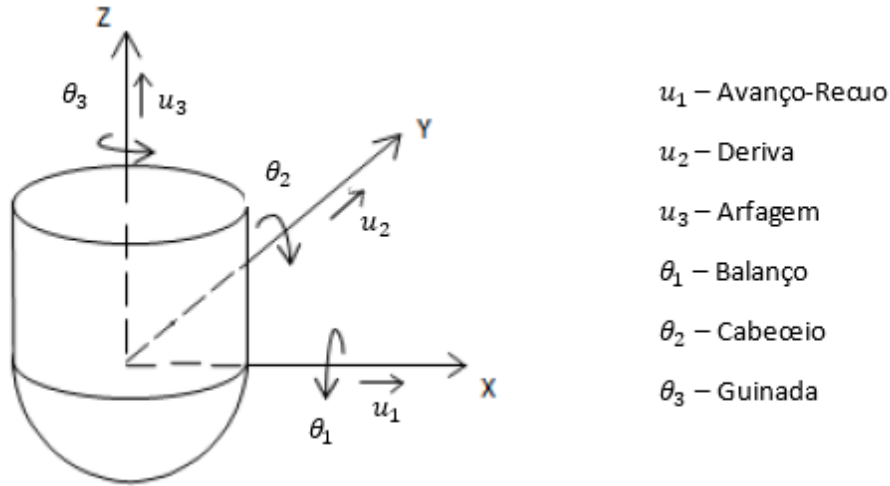


Figura 3.5: Graus de liberdade e as respectivas nomenclatura de um corpo flutuante, adaptado de [43].

O potencial de velocidade total pode ser dado por [23]:

$$\phi(\mathbf{x})e^{-i\omega t} = [\phi_I(\mathbf{x}) + \phi_D(\mathbf{x}) + \phi_R(\mathbf{x})]e^{-i\omega t} \quad (3.36)$$

onde  $\phi_I$  é o potencial da onda incidente,  $\phi_D$  é o potencial de difração e  $\phi_R$  é o potencial de radiação.

O potencial de radiação pode ainda ser expresso por [23]:

$$\phi_R = \sum_{j=1}^6 \phi_r x_j \quad (3.37)$$

onde  $\phi_r$  representa o potencial de radiação segundo o modo  $j$ , com amplitude unitária  $x_j$ .

Para obter soluções dos potenciais apresentados, o programa ANSYS Aqwa recorre ao problema de valores fronteira apresentado no Capítulo 2. O potencial da onda incidente é dado pela teoria de Airy ou pela teoria de 2ª ordem de Stokes. O potencial de difração e o potencial de radiação devem respeitar a Equação de Laplace, Equação (3.6), e as condições de fronteira na superfície do corpo, Equação (3.8), no fundo, Equação (3.9), e na superfície livre, Equação (3.16).

Uma condição para o potencial de radiação deve ser acrescentada, de forma a que quando a distância ao corpo aumente, isto é  $\sqrt{(x^2 + y^2)} \rightarrow \infty$ , a perturbação gerada pelo mesmo tenda a dissipar-se, isto é:

$$\nabla \phi_R \rightarrow 0, \quad \text{quando } \sqrt{(x^2 + y^2)} \rightarrow \infty \quad (3.38)$$

De igual modo, uma nova condição deve ser acrescentada ao potencial de velocidades do problema de difração. Para garantir a impermeabilidade do corpo, o potencial de difração deve ser nulo na sua superfície e portanto:

$$\frac{\partial \phi_I + \phi_D}{\partial n} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \phi_I}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_D}{\partial n} \quad (3.39)$$

Os potenciais de velocidade de difração e de radiação são determinados no ANSYS Aqwa utilizando o método dos painéis. Este método recorre à função de Green para determinar o potencial através de uma distribuição de fontes sobre a área molhada do corpo [23]:

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \psi(\xi) G(\mathbf{x}, \xi) dS, \quad \text{onde } \mathbf{x} \in S_0 \quad (3.40)$$

onde  $S_0$  é a área molhada do corpo,  $\xi$  é a posição da fonte e  $G$  é a função de Green que descreve o escoamento num dado ponto  $(x, y, z)$ , originado pela fonte  $\psi$  em  $\xi$ .

A função de Green satisfaz a Equação de Laplace e as restantes condições de fronteira com exceção da condição de velocidade normal na superfície do corpo.

A intensidade da fonte sobre a área molhada do corpo pode ser determinada da seguinte forma [23]:

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x})}{\partial n(\mathbf{x})} = -\frac{1}{2} \psi(\mathbf{x}) + \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \psi(\xi) \frac{\partial G(\mathbf{x}, \xi)}{\partial n(\mathbf{x})} dS, \quad \text{onde } \mathbf{x} \in S_0 \quad (3.41)$$

O método de painéis de Hess-Smith é utilizado no ANSYS Aqwa para resolver a Equação (3.41), na qual a área molhada do corpo é dividida em painéis quadrilaterais ou

triangulares. Assume-se que o potencial e que a intensidade da fonte em cada painel são constantes e correspondem ao respetivo valor médio sobre a superfície dos painéis. O integral, no domínio discreto, das Equações (3.40) e (3.41) toma, respetivamente, a seguinte forma [23]:

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{m=1}^{N_p} \psi_m G(\mathbf{x}, \xi_m) \Delta S_m, \quad \text{onde } \mathbf{x} \in \Omega \cup S_0 \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}_k)}{\partial n(\mathbf{x}_k)} = -\frac{1}{2} \psi(\mathbf{x}_k) + \frac{1}{4\pi} \sum_{m=1}^{N_p} \psi_m \frac{\partial G(\mathbf{x}_k, \xi_m)}{\partial n(\mathbf{x}_k)} \Delta S_m, \quad \text{onde } \mathbf{x}_k \in S_0 \text{ e } k = 1, N_p \quad (3.43)$$

onde  $N_p$  é o número total de painéis sobre a área molhada,  $\Delta S_m$  é a área do painel  $m$ ,  $\Omega$  é o domínio do fluido e  $\mathbf{x}_k$  representa as coordenadas do centro geométrico do painel.

Uma vez conhecidos os potenciais de velocidade, a distribuição da pressão pode ser determinada utilizando a Equação de Bernoulli [23]:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \rho g z = i\omega \rho \phi(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \quad (3.44)$$

As forças exercidas pelo fluido podem agora ser calculadas integrando a pressão sobre a área molhada do corpo. A notação do vetor unitário normal à superfície de um corpo,  $\vec{n}$ , introduzida no Capítulo 2, pode ser estendida aos seis graus de liberdade de um corpo rígido, da seguinte forma [23]:

$$\begin{cases} (n_1, n_2, n_3) = \vec{n}, \\ (n_4, n_5, n_6) = \vec{r} \times \vec{n} \end{cases} \quad (3.45)$$

onde  $\vec{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_g$  é o vetor posição de um ponto na superfície do corpo relativo ao centro de gravidade,  $\mathbf{x}_g$ .

As componentes da força e do momento hidrodinâmico podem ser dadas, de forma generalizada por [23]:

$$F_j e^{-i\omega t} = - \int_{S_0} p \vec{n} dS = \left[ -i\omega \rho \int_{S_0} \phi(\mathbf{x}) n_j dS \right] e^{-i\omega t}, \quad \text{com } j = 1, 3 \quad (3.46)$$

$$M_j e^{-i\omega t} = - \int_{S_0} p \vec{r} \times \vec{n} dS = \left[ -i\omega \rho \int_{S_0} \phi(\mathbf{x}) n_j dS \right] e^{-i\omega t}, \quad \text{com } j = 4, 6 \quad (3.47)$$

A força hidrodinâmica total é dada por [23]:

$$F_j = \left[ (F_{Ij} + F_{Dj}) + \sum_{k=1}^6 F_{rjk} x_k \right], \quad \text{com } j = 1, 6 \quad (3.48)$$

A força de Froude-Krylov, que corresponde à ação isolada da onda não perturbada sobre a área molhada do corpo, segundo o modo  $j$  é dada por [23]:

$$F_{Ij} = -i\omega\rho \int_{S_0} \phi_I(\mathbf{x})n_j dS \quad (3.49)$$

A força de difração, que corresponde à perturbação do potencial da onda incidente, segundo o modo  $j$  é dada por [23]:

$$F_{Dj} = -i\omega\rho \int_{S_0} \phi_D(\mathbf{x})n_j dS \quad (3.50)$$

A força de radiação segundo o modo  $j$  provocada pela amplitude unitária do movimento do corpo segundo a direção  $k$  é dada por [23]:

$$F_{Rjk} = -i\omega\rho \int_{S_0} \phi_R(\mathbf{x})n_j dS \quad (3.51)$$

A força de Froude-Krylov juntamente com a força de difração permite obter a força de excitação,  $F_{ex}$ .

O potencial de radiação pode ser decomposto na parte real e na parte imaginária dando origem, respetivamente, aos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento. Substituindo na Equação (3.51) resulta [23]:

$$F_{Rjk} = -i\omega\rho \int_{S_0} \Re[\phi_{Rk}(\mathbf{x})] + \Im[\phi_{Rk}(\mathbf{x})]n_j dS = \omega^2\mu_a + i\omega\nu_a \quad (3.52)$$

onde os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento são, respetivamente, dados por [23]:

$$\mu_a = \frac{\rho}{\omega} \int_{S_0} \Im[\phi_{Rk}(\mathbf{x})]n_j dS \quad (3.53)$$

$$\nu_a = -\rho \int_{S_0} \Re[\phi_{Rk}(\mathbf{x})]n_j dS \quad (3.54)$$

O conceito de massa adicionada resulta da necessidade de exercer mais força no dispositivo quando este é acelerado num fluido. Na verdade, para acelerar o corpo é necessário acelerar também o fluido na sua vizinhança. O conceito de massa adicionada traduz esta "dupla"aceleração. O coeficiente de amortecimento traduz a energia dissipada na radiação de ondas pelo movimento do corpo.

A integração do último termo da Equação (3.44), permite obter a força hidrostática,  $F_H$ :

$$F_H = \int_{S_0} \rho g z \vec{n} dS \quad (3.55)$$

Uma vez conhecidas as forças que atuam no dispositivo o ANSYS Aqwa determina a equação do movimento dada pela Equação (3.35). O movimento do OWSC é dado pelo equilíbrio dinâmico dos momentos em torno do eixo de rotação.

## VALIDAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Este capítulo tem como principal objetivo demonstrar a capacidade do ANSYS Aqwa para simular a hidrodinâmica dos OWSCs. Inicialmente, procede-se à validação de um OWSC com geometria cilíndrica. Fazem-se dois testes distintos: um de decaimento e um de movimento livre. Posteriormente, procede-se à validação da hidrodinâmica de um OWSC sob a ação de ondas regulares. No final do capítulo, discutem-se os resultados numéricos obtidos.

### 4.1 Validação de um OWSC com geometria cilíndrica

Nesta secção a validação é feita usando um WEC cujo funcionamento é semelhante ao de um OWSC com a particularidade de ter uma geometria cilíndrica. De forma a avaliar e verificar a precisão do modelo numérico, os resultados numéricos obtidos são comparados com os resultados experimentais do modelo físico apresentado em [44] e ainda com os resultados numéricos obtidos por outros autores [45].

#### 4.1.1 Descrição do modelo experimental

O modelo experimental consiste num cilindro flutuante articulado num eixo horizontal junto ao fundo do canal, através de rolamentos. Neste ensaio foi utilizado um batedor do tipo pistão para gerar ondas regulares com  $H = 0.03$  m e  $f = 0.96$  Hz. O sistema foi montado de modo a que o cilindro apenas apresente movimento de cabeceio e esteja alinhado com a direção das ondas incidentes. Um amortecedor foi ainda montado de modo a simular o efeito do sistema PTO. Na Figura 4.1 apresenta-se um esquema do modelo experimental.

Na Tabela 4.1 apresentam-se as características do cilindro.

O valor de  $\bar{z}$  do centro de massa do cilindro é relativo ao fundo do canal.

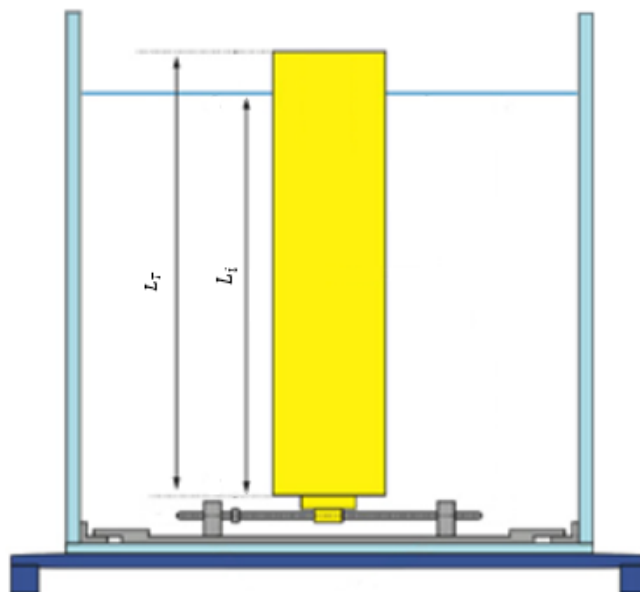


Figura 4.1: Esquema do modelo experimental, adaptado de [44].

Tabela 4.1: Características do cilindro [44].

Dimensões	Símbolo	Valor	Unidades
Altura	$L_T$	0.725	m
Altura imersa	$L_i$	0.665	m
Diâmetro	$D$	0.2	m
Massa	$m$	4.95	kg
Momento de inércia	$I$	1	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Centro de massa	$(\bar{x}; \bar{y}; \bar{z})$	(0; 0; 0.327)	m

#### 4.1.2 Comparação dos resultados

A modelação geométrica do cilindro foi realizada no Ansys AQWA, onde se reproduziu o ensaio efetuado em [45]. A discretização está intimamente ligada à frequência de onda máxima permitida, simulada pela rotina *Hydrodynamic Response*. Desta forma, pretendendo-se analisar a resposta do sistema quando excitado por ondas regulares com  $f = 0.96$  Hz (ver Secção 4.1.2.2) foi escolhida para dimensão dos painéis um valor de 0.1 m. Na Figura 4.2 apresenta-se a malha utilizada.

O modelo numérico foi validado considerando dois testes distintos: o teste de decaimento e o teste de movimento livre.

O sistema PTO considerado para ambos os testes é composto por uma mola com constante de rigidez de  $1 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$  e um amortecedor com coeficiente de amortecimento de  $10 \text{ N}\cdot\text{m}/(^\circ/\text{s})$ .



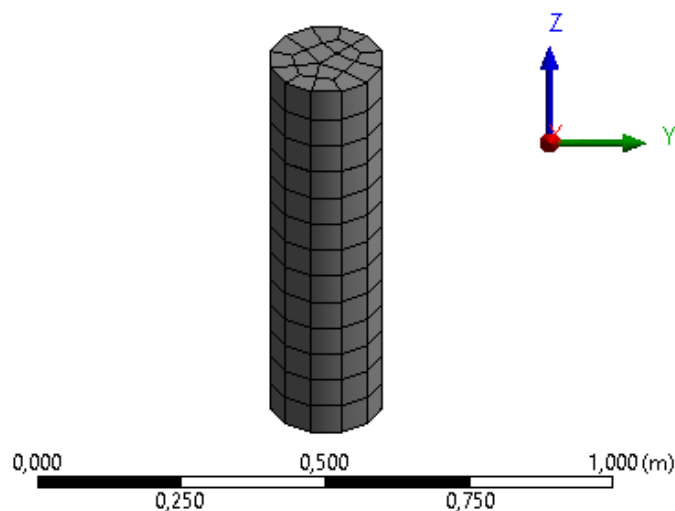


Figura 4.2: Representação da malha utilizada na simulação.

#### 4.1.2.1 Teste de decaimento

O teste de decaimento consiste em estudar a frequência das oscilações amortecidas do cilindro acoplado ao sistema PTO.

De acordo com o modelo experimental, o teste foi realizado em água parada e o cilindro foi inicialmente deslocado de um ângulo de  $25^\circ$  da sua posição vertical [44]. Devido às limitações do programa ANSYS Aqwa em estabelecer o deslocamento inicial, simulou-se o deslocamento aplicando um momento em torno do eixo  $y$ ,  $M_y = -95 \text{ N}\cdot\text{m}$ , no dispositivo durante  $0.1 \text{ s}$ , provocando um ângulo de cabeceio de  $25^\circ$ . Na Figura 4.3 apresenta-se o deslocamento inicial do cilindro.

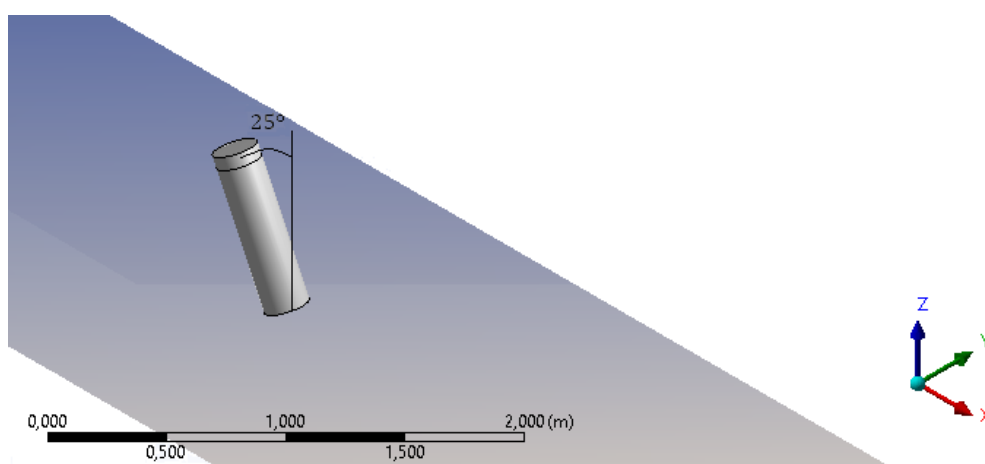


Figura 4.3: Deslocamento inicial do cilindro imposto pela aplicação do momento no ANSYS Aqwa.

Na Figura 4.4 apresenta-se a série temporal do teste de decaimento do cilindro, onde  $\theta_c$  é o ângulo de rotação do cilindro em torno da posição vertical.

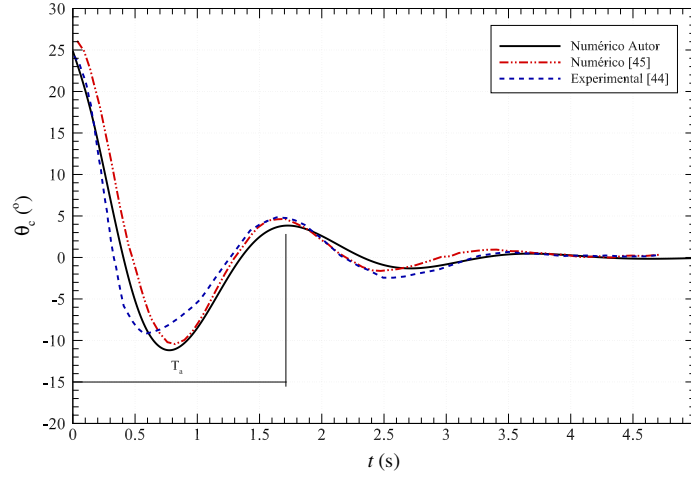


Figura 4.4: Série temporal do teste de decaimento do cilindro.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados do teste de decaimento. A frequência amortecida do dispositivo,  $f_a$ , é estimada através da seguinte forma:

$$f_a = \frac{1}{T_a} \quad (4.1)$$

onde  $T_a$  é o período amortecido.

Tabela 4.2: Resultados do teste de decaimento.

Teste	$T_a$ [s]	$f_a$ [Hz]	Erro relativo de $T_a$	Erro relativo de $f_a$
Experimental [44]	1.65	0.61	-	-
Numérico [45]	1.70	0.59	3.0%	3.3%
Numérico Autor	1.73	0.58	4.8%	4.9%

A necessidade de aplicar o momento de modo a garantir o deslocamento inicial do cilindro introduz uma dificuldade acrescida. Na Figura 4.4, verifica-se maior concordância entre os resultados numéricos do que com os resultados experimentais. Esta diferença pode ser explicada devido ao efeito da viscosidade nos testes experimentais que faz com que o período amortecido seja menor que nos casos numéricos. Ainda assim, existe uma boa concordância entre resultados, como se irá demonstrar de seguida.

A concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos é quantificada com recurso a dois parâmetros estatísticos: erro de amplitude adimensional,  $A_\chi$ , e erro de fase adimensional,  $\phi_\chi$ , dados, respetivamente, por:

$$A_\chi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\chi_i^{num})^2}{\sum_{i=1}^N (\chi_i^{exp})^2}} \quad (4.2)$$

$$\phi_\chi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\chi_i^{num} - \chi_i^{exp})^2}{\sum_{i=1}^N (\chi_i^{exp})^2}} \quad (4.3)$$

onde  $\chi_i$  é a magnitude do sinal,  $N$  é o número de amostras retiradas do sinal e os sobrescritos *num* e *exp* referem-se aos valores numéricos e experimentais, respetivamente. De acordo com [9, 46] uma boa concordância entre resultados experimentais e resultados numéricos traduz-se por  $A_\chi \approx 1$  e  $\phi_\chi < 0.25$ . Uma concordância perfeita entre os resultados significaria  $A_\chi \rightarrow 1$  e  $\phi_\chi \rightarrow 0$  [46].

Na Tabela 4.3, apresenta-se um resumo dos erros obtidos no teste de decaimento.

Tabela 4.3: Erros obtidos no teste de decaimento.

Testes	$A_\chi$	$\phi_\chi$
Numérico Autor - Experimental [44]	1.034	0.289
Numérico Autor - Numérico [45]	0.914	0.215

Para os resultados apresentados na Figura 4.4, obteve-se  $A_\chi = 1.034$  e  $\phi_\chi = 0.289$ . Para  $A_\chi > 1$  significa que o resultado numérico superestimou os resultados experimentais, no que diz respeito à amplitude do sinal, como é visível na Figura 4.4. Ainda assim, como o valor é próximo de 1 pode-se concluir que existe uma boa concordância entre os resultados [46]. Verifica-se que o valor de  $\phi_\chi$  é aproximadamente 0.25. As discrepâncias que se observam entre os resultados são justificadas pelas limitações do ANSYS Aqwa em reproduzir as condições experimentais e ainda pelo facto de não ter sido feito qualquer ajuste aos efeitos provocados pela viscosidade.

#### 4.1.2.2 Teste de movimento livre

O teste de movimento livre consiste em avaliar a resposta do dispositivo, isto é, o seu movimento angular, quando excitado por ondas regulares com  $H = 0.03$  m e  $f = 0.96$  Hz. Na Figura 4.5 apresenta-se a série temporal do ângulo de rotação do cilindro,  $\theta_c$ .

O resumo dos erros obtidos para os resultados da Figura 4.5, encontra-se apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Erros obtidos no teste de movimento livre.

Testes	$A_\chi$	$\phi_\chi$
Numérico Autor - Experimental [44]	1.114	-
Numérico Autor - Numérico [45]	1.053	-

Confirma-se que existe uma boa concordância entre os resultados. Verifica-se que o erro de amplitude entre os resultados numéricos é inferior ao erro entre os resultados numérico e experimental. Esta situação pode ser consequência do efeito viscoso, presente no ensaio experimental e ausente nas simulações numéricas. Verifica-se ainda que o movimento de rotação do cilindro não é simétrico face à posição vertical visto que se utilizou a teoria de 2ª ordem para a agitação regular. Neste sentido, a assimetria é explicada pelo

facto de na teoria de 2ª ordem a crista da onda ser ligeiramente maior que a cava. A diferença de fase que se verifica entre os resultantes não é relevante uma vez que a origem dos tempos não é igual para as três situações. Opta-se assim por não apresentar o respetivo erro.

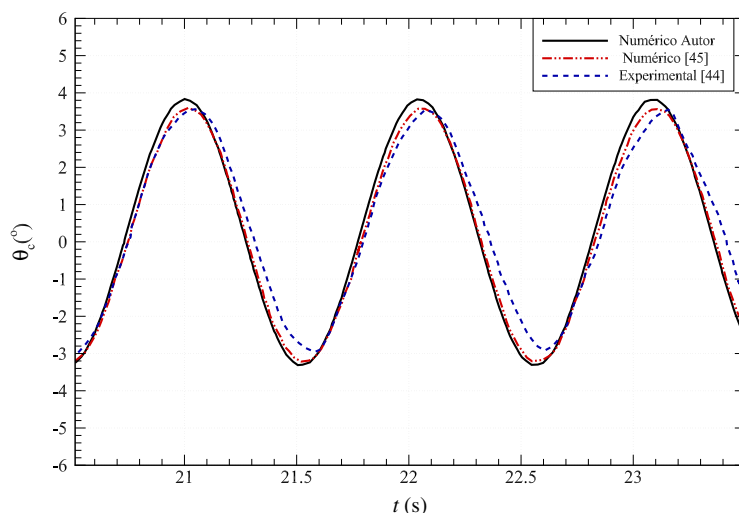


Figura 4.5: Séries temporais dos testes de movimento livre do cilindro.

## 4.2 Validação de um OWSC

Nesta secção, apresenta-se a validação de um OWSC. Para tal, simulam-se as condições experimentais apresentadas em [9].

### 4.2.1 Descrição do modelo experimental

Os testes experimentais foram realizados num canal de ondas com aproximadamente 60 m de comprimento (na direcção da propagação das ondas), 1,5 m de largura e 1,8 m de profundidade. Numa das extremidades do canal foi colocado um batedor do tipo pistão com absorção dinâmica, capaz de gerar ondas regulares e irregulares. Na outra extremidade, existe uma praia dissipativa com declive longitudinal de 0.3 m/m. Na Figura 4.6 apresenta-se um esquema da montagem experimental.

O OWSC usado é composto por uma placa oscilante e por um sistema PTO hidráulico. Devido aos efeitos fortemente não-lineares retirou-se o efeito do PTO nesta validação, considerando-se apenas a placa sujeita a agitação regular. Na Figura 4.7 apresenta-se um esquema mais detalhado do modelo do OWSC utilizado neste estudo experimental.

Na Tabela 4.5 apresentam-se as principais características da placa oscilante utilizada.

A hidrodinâmica do OWSC é testada para as condições apresentadas na Tabela 4.6.

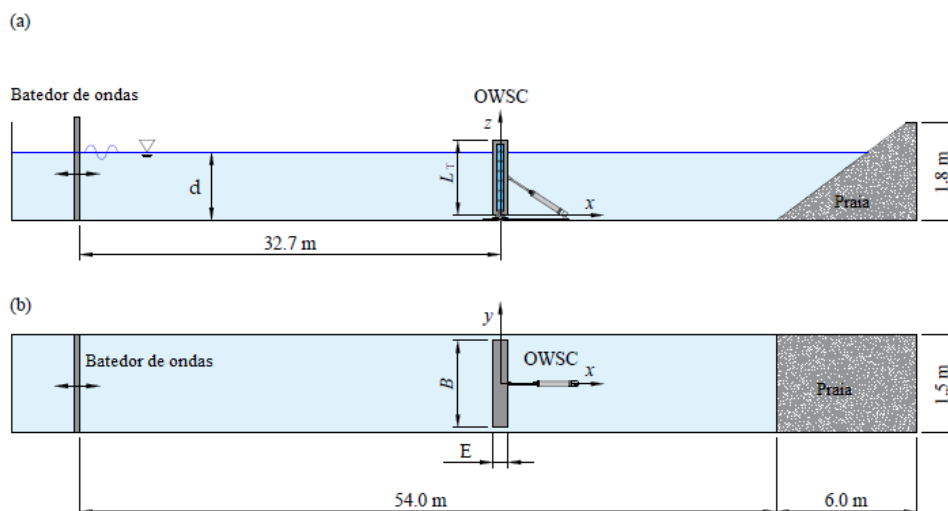


Figura 4.6: Esquema da instalação experimental: (a) vista lateral; (b) vista em planta, adaptado de [9].

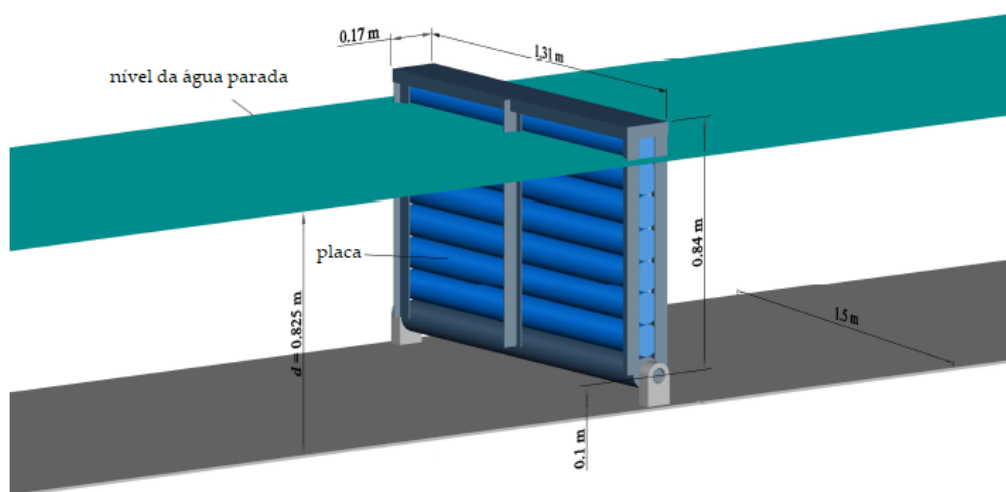


Figura 4.7: Esquema do OWSC, adaptado de [9].

Tabela 4.5: Características da placa, adaptado de [9].

Dimensões	Símbolo	Valor	Unidades
Altura	$L_T$	0.84	m
Largura	$B$	1.31	m
Espessura	$E$	0.17	m
Massa	$m$	72.3	kg
Momento de inércia	$(I_{xx}; I_{yy}; I_{zz})$	(27.61; 14.76; 13.11)	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Centro de massa	$(\bar{x}; \bar{y}; \bar{z})$	(0; 0; 0.33)	m

Tabela 4.6: Características das ondas consideradas para a validação da hidrodinâmica do OWSC.

Simulação	$H$ [m]	$T$ [s]
R1	0.15	2.0
R2	0.15	2.5
R3	0.15	3.0
R4	0.20	2.0
R5	0.20	2.5
R6	0.20	3.0

#### 4.2.2 Comparação dos resultados

Visto que os detalhes geométricos são pouco relevantes para o ANSYS Aqwa, que permite um máximo de 40000 elementos de malha para evitar grandes requisitos computacionais e reduzir o tempo de simulação, não foi possível reproduzir de forma precisa a geometria do OWSC utilizado no caso experimental. Na Figura 4.8 apresenta-se o esquema da geometria adotada para a simulação.

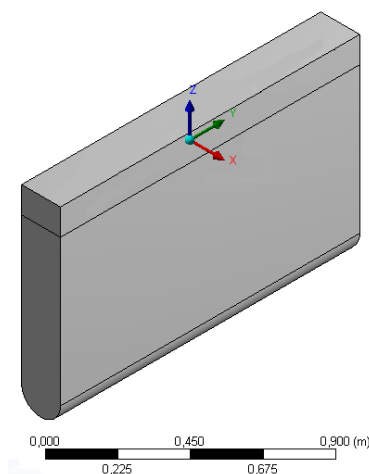


Figura 4.8: Geometria simplificada da placa oscilante utilizada nas simulações.

Efetuuou-se um teste para analisar a convergência da malha onde foram consideradas três malhas distintas. O teste consiste em comparar os resultados do movimento angular da placa oscilante, obtidos para as diferentes malhas consideradas, para a condição R1 (ver Tabela 4.6). Na Tabela 4.7 apresentam-se as características de cada uma das malhas.

Tabela 4.7: Características das malhas consideradas.

Malha	Número de elementos de malha	Tamanho máximo dos elementos de malha [m]
Malha 1	5132	0.04
Malha 2	2389	0.06
Malha 3	1388	0.08

Na Figura 4.9 apresenta-se o resultado das séries temporais do movimento angular da placa oscilante do teste de convergência da malha para  $50 \leq t \leq 100$  s.

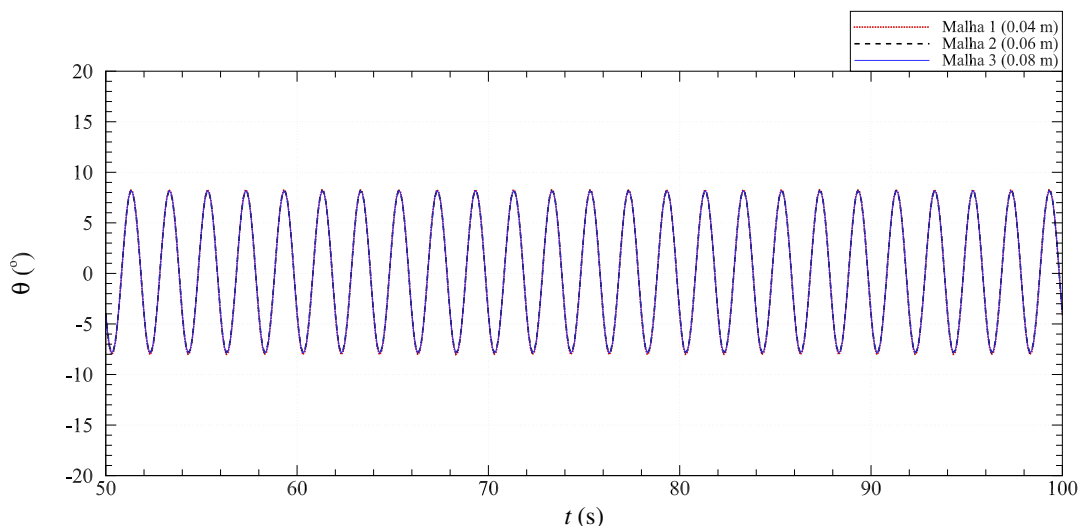


Figura 4.9: Séries temporais da rotação da placa oscilante para o teste de convergência da malha.

Como se pode observar, os resultados obtidos para as três malhas consideradas são muito semelhantes, uma vez que se verifica uma quase total sobreposição dos sinais. Desta forma, a malha utilizada para as simulações subsequentes foi a Malha 3 para reduzir os tempos de simulação. Na Figura 4.10 apresenta-se a Malha 3.

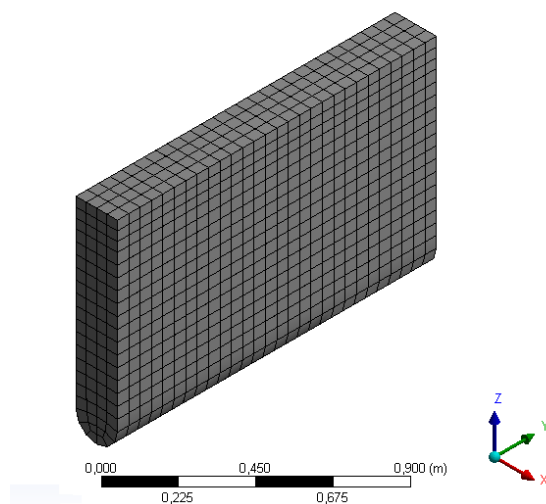


Figura 4.10: Representação da Malha 3.

Para minimizar as consequências do efeito viscoso (presente nos ensaios experimentais), que se evidenciaram nos testes de validação do OWSC com geometria cilíndrica optou-se por introduzir um coeficiente de amortecimento na articulação.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se a comparação entre os resultados experimentais

e numéricos das séries temporais do movimento angular do OWSC para as condições apresentadas na Tabela 4.6 para  $50 \leq t \leq 100$  s. Como se pode observar, existe uma grande semelhança na dinâmica da placa oscilante. Esta evidência pode ser explicada pela ação do batedor com absorção dinâmica existente no modelo experimental que impede a re-reflexão de ondas evitando a sobreposição das ondas incidentes e refletidas e ainda da presença de uma praia dissipativa. Tal como no modelo experimental, no modelo numérico não existe reflexão de ondas em nenhuma das extremidades do canal, por defeito do programa.

Os erros obtidos dos resultados apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12, encontram-se apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Erros obtidos na validação do OWSC.

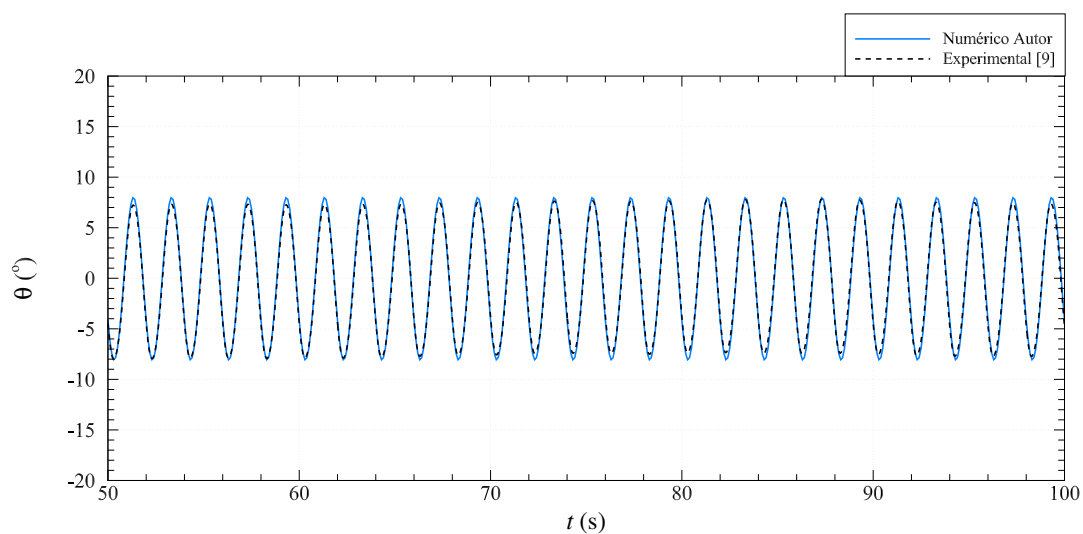
Simulação	$A_\chi$	$\phi_\chi$
R1	1.046	0.155
R2	1.016	0.119
R3	1.007	0.162
R4	1.022	0.221
R5	0.973	0.068
R6	1.001	0.107

Relativamente aos resultados obtidos verifica-se que existe uma concordância entre os resultados numéricos e experimentais. A correção imposta pelos efeitos viscosos que foi introduzida nesta série de simulações, com a implementação de um coeficiente de amortecimento na articulação de  $2 \text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ}/\text{s})$ , que pretende modelar os efeitos do atrito, resultou numa melhoria dos resultados em comparação com a validação do OWSC com geometria cilíndrica.

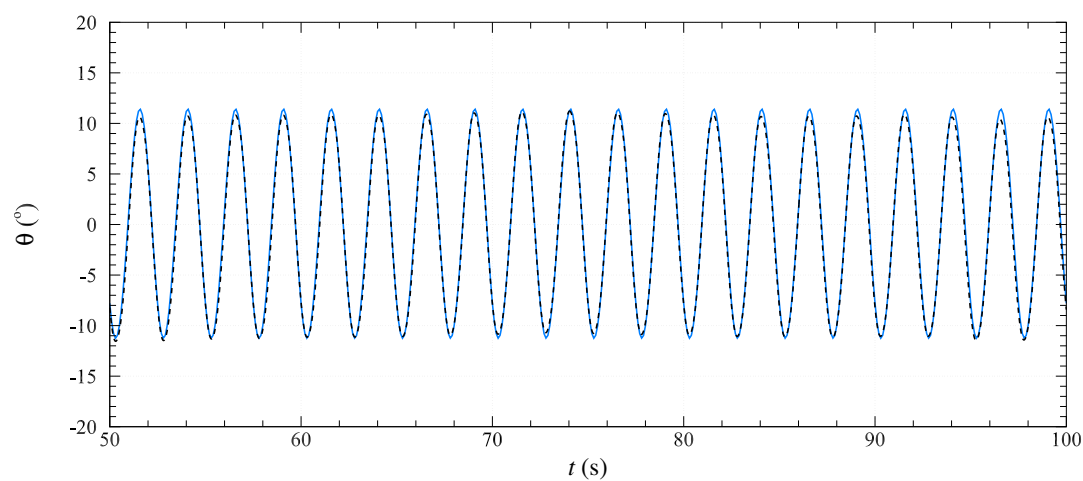
De uma forma geral os resultados numéricos apresentam boa concordância com os resultados experimentais. Portanto, parece lícito afirmar que o modelo numérico permite simular a hidrodinâmica do OWSC.



(a)



(b)



(c)

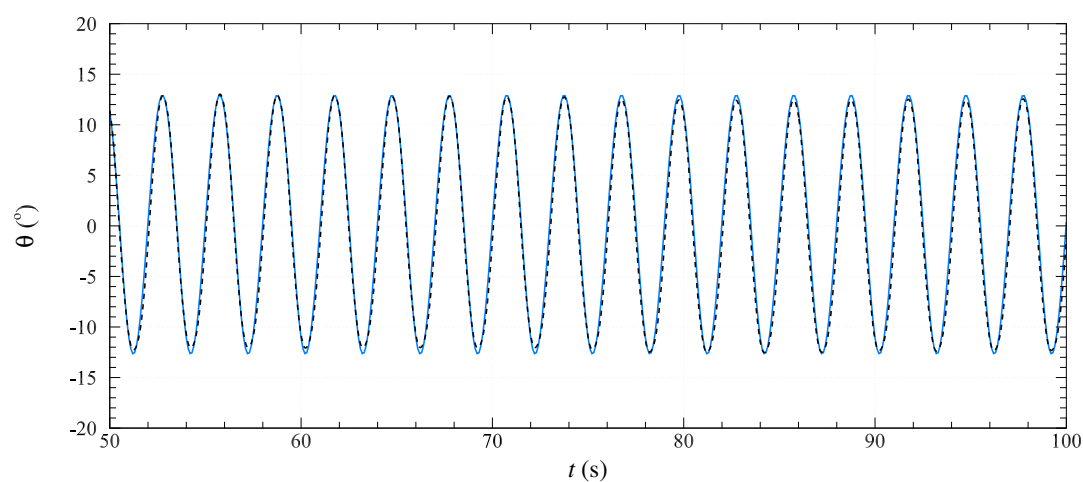
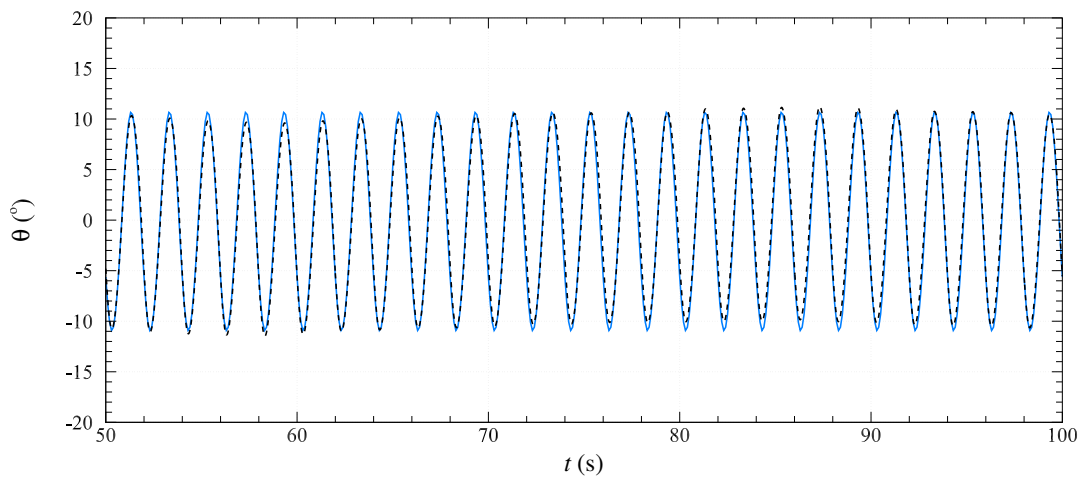
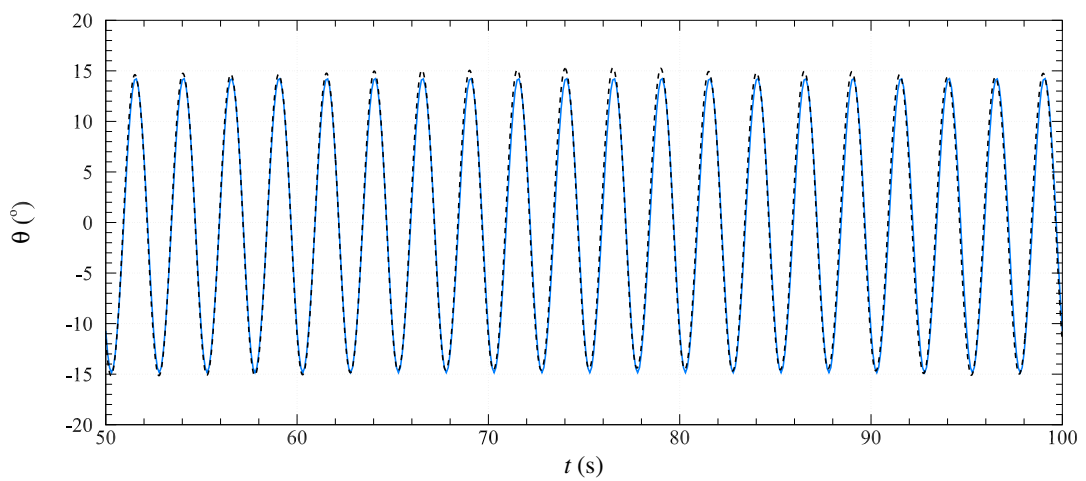


Figura 4.11: Comparação dos resultados experimentais e numéricos dos testes de validação do OWSC para os ensaios: (a) R1; (b) R2; (c) R3.

(d)



(e)



(f)

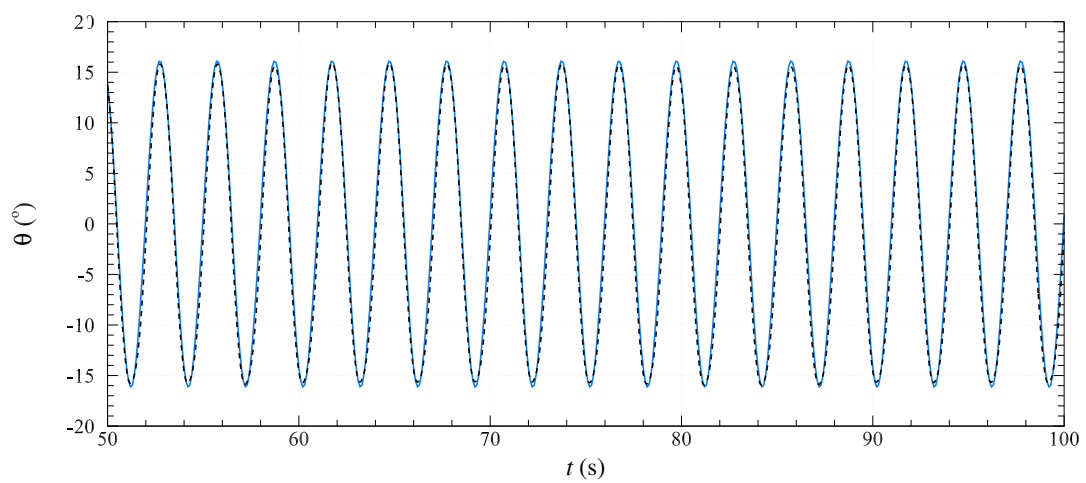


Figura 4.12: Comparação dos resultados experimentais e numéricos dos testes de validação do OWSC para os ensaios: (d) R4; (e) R5; (f) R6.

## RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo efetua-se uma análise numérica do OWSC, considerando a influência da massa e altura do centro de massa da placa oscilante, do período e comprimento de onda da agitação incidente e também do sistema PTO. Esta análise é realizada para agitação regular.

### 5.1 Caso referência e análise de dados

Na sequência dos testes de validação do OWSC apresentados na Secção 4.2, neste capítulo repetem-se as condições do modelo experimental ensaiadas. Desta forma, define-se como caso referência, *CR*, o OWSC cujas características se apresentam na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características do OWSC do caso referência.

Dimensões	Símbolo	Valor	Unidades
Altura	$L_T$	0.84	m
Largura	$B$	1.31	m
Espessura	$E$	0.17	m
Massa	$m$	72.30	kg
Momento de inércia	$(I_{xx}; I_{yy}; I_{zz})$	(30.87; 18.02; 13.11)	kg·m <sup>2</sup>
Centro de massa	$(\bar{x}; \bar{y}; \bar{z})$	(0; 0; -0.394)	m
Coeficiente de rigidez da mola do PTO	$K_{PTO}$	10	N·m/°
Coeficiente de amortecimento do PTO	$C_{PTO}$	50	N·m/(°/s)

Os valores dos momentos de inércia e da altura do centro de massa da placa oscilante são referentes ao sistema de eixos representado na Figura 4.8, onde a origem do referencial coincide com a superfície livre não perturbada da água do canal.

A análise da influência dos diferentes parâmetros na dinâmica do OWSC é feita comparando o caso de referência com os diferentes casos. Neste trabalho, escolheu-se este caso de referência, uma vez que a massa da placa oscilante tem uma distribuição uniforme.

As condições de agitação regular consideradas para a análise da influência da massa e altura do centro de massa da placa oscilante e do sistema PTO, são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características da agitação regular.

Condição	$H$ [m]	$T$ [s]
AR1	0.25	3.5
AR2	0.25	2.5

A potência instantânea extraída pelo OWSC,  $P_{out}$ , é obtida através de [6, 31]:

$$P_{out}(t) = \frac{1}{2} C_{PTO} \dot{\theta}^2(t) \quad (5.1)$$

A potência média incidente por unidade de largura,  $\bar{P}_{in}$ , para agitação regular é dada, de acordo com a teoria linear, por:

$$\bar{P}_{in} = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g \quad (5.2)$$

onde  $c_g$  é a velocidade de grupo, que para condições de profundidade intermédia ( $0.5 < d/L < 0.04$ ) é dada por:

$$c_g = \frac{\omega}{2k} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (5.3)$$

Uma das formas de avaliar a performance do OWSC e a sua capacidade de extração de energia é a CWR (*Capture Width Ratio*), definido da seguinte forma [31]:

$$CWR = \frac{\bar{P}_{out}}{\bar{P}_{in} B} \quad (5.4)$$

onde  $\bar{P}_{out}$  é a potência média extraída pelo OWSC.

## 5.2 Influência da massa/inércia

Nesta secção apresenta-se a análise da influência da massa da placa oscilante na dinâmica do OWSC. Neste contexto, faz-se variar a massa da placa oscilante e consequentemente os momentos de inércia. Considera-se que a massa se distribui uniformemente por toda a placa e que, portanto, a altura do centro de massa se mantém constante,  $\bar{z} = -0.394$  m. Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores da massa e dos momentos de inércia da placa oscilante para os casos considerados.

Tabela 5.3: Massa e momentos de inércia da placa oscilante.

Caso	$m$ [kg]	$I_{xx}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$I_{yy}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$I_{zz}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
M <sub>1</sub>	43.4	18.52	10.81	7.86
M <sub>2</sub>	50.6	21.59	12.60	9.17
M <sub>3</sub>	57.8	24.66	14.40	10.47
M <sub>4</sub>	65.1	27.78	16.21	11.80
CR	72.3	30.87	18.02	13.11
M <sub>6</sub>	79.5	33.92	19.80	14.40
M <sub>7</sub>	86.8	37.04	21.62	15.73
M <sub>8</sub>	94.0	40.11	23.41	17.03
M <sub>9</sub>	101.2	43.18	25.20	18.34

Nas Figuras 5.1 e 5.2 comparam-se a amplitude de rotação, a velocidade angular da placa e a potência instantânea extraída pelo OWSC do caso de referência (caso CR) e os casos M<sub>1</sub> e M<sub>9</sub>, para as condições de agitação AR1 e AR2, respetivamente. Observa-se que existe total sobreposição entre as curvas para ambas as condições. Assim, conclui-se que a variação da massa da placa oscilante não tem influência significativa no comportamento dinâmico da placa e, conseqüentemente, na potência instantânea extraída.

Na Figura 5.3 apresenta-se a evolução de CWR com a variação da massa da placa oscilante. Pode-se observar que CWR se mantém praticamente constante para ambas as condições de agitação, conforme seria previsível pelos resultados apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2, apresentando uma diferença máxima de aproximadamente 0.5% e 0.4% para AR1 e AR2, respetivamente, o que confirma a anterior conclusão.

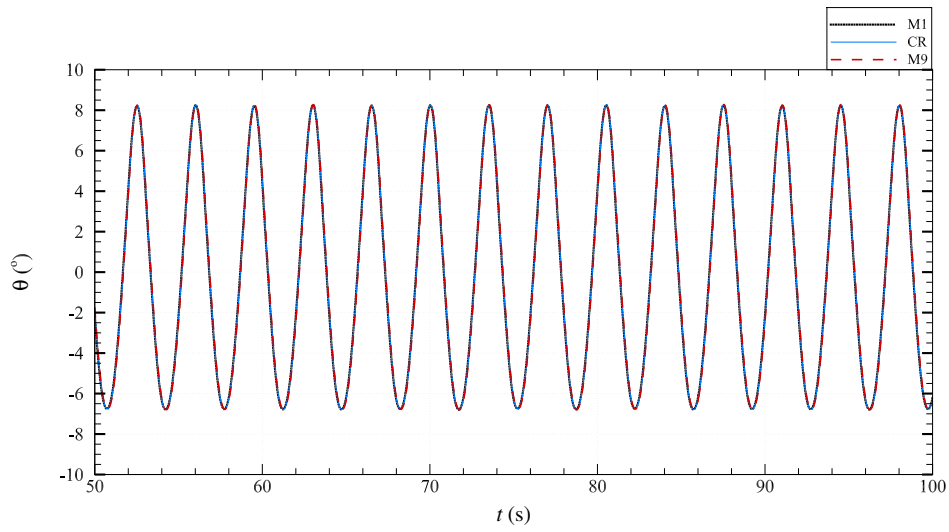
Uma vez que os resultados obtidos sugerem que a massa não tem influência significativa na dinâmica da placa oscilante, efetuaram-se duas simulações adicionais considerando-se uma massa muito elevada e uma massa muito reduzida. Para o primeiro caso (massa muito elevada), verificou-se que o programa não foi capaz de simular devidamente a dinâmica do OWSC, visto que a placa começou a rodar em torno da articulação, não respeitando a condição de fronteira do fundo. Relativamente ao segundo caso (massa muito reduzida), verificou-se que a placa praticamente não apresentava movimento de rotação.

Considerando estes resultados, pode-se concluir que a influência da massa na dinâmica do sistema induz efeitos contraditórios:

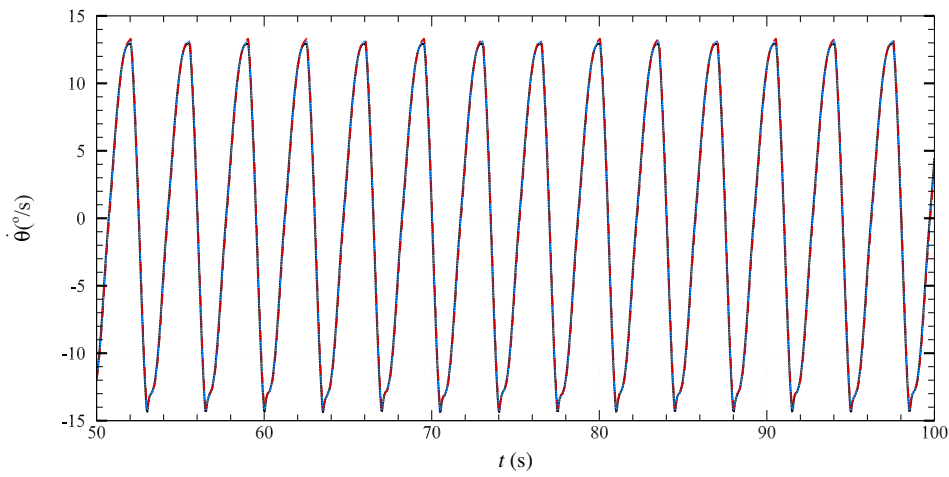
- Se a massa da placa oscilante for muito elevada, a rotação em torno da posição vertical o pode provocar a queda da placa anulando a componente elástica do PTO.
- Uma massa muito reduzida terá uma componente das forças verticais aproximada à força de restituição (impulsão), o que impede o movimento da placa.

As conclusões apresentadas contrariam a ideia de que uma placa com menor inércia deveria ter movimentos de maior amplitude.

(a)



(b)



(c)

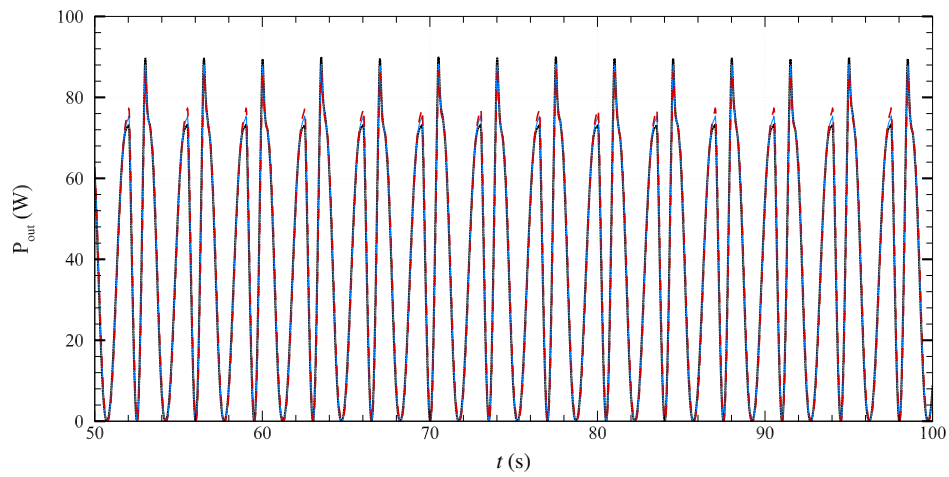
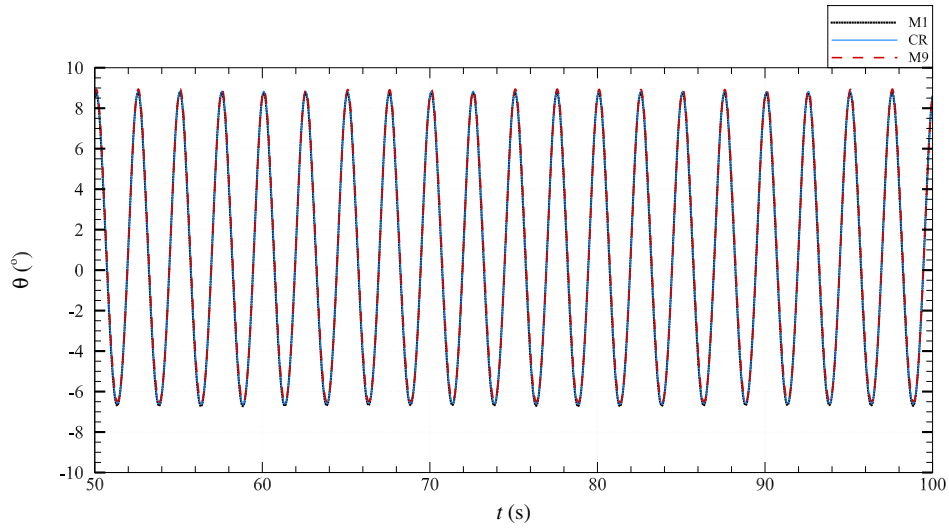
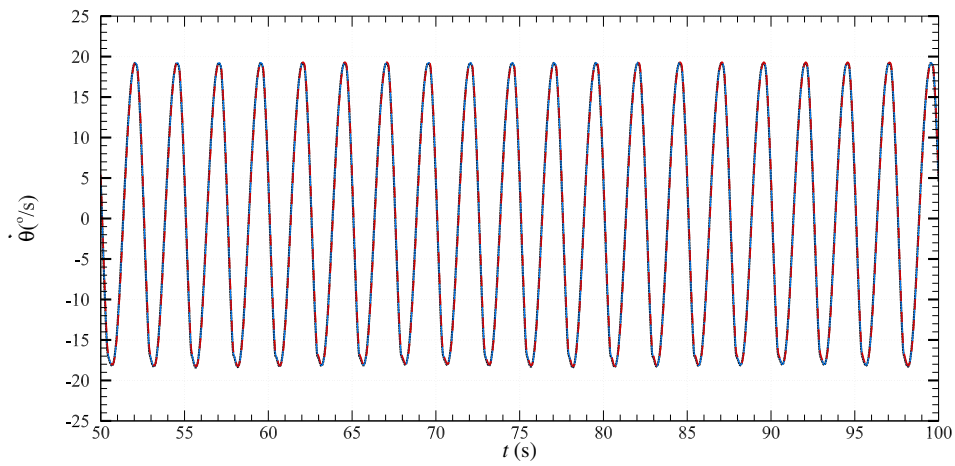


Figura 5.1: Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa ; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

(a)



(b)



(c)

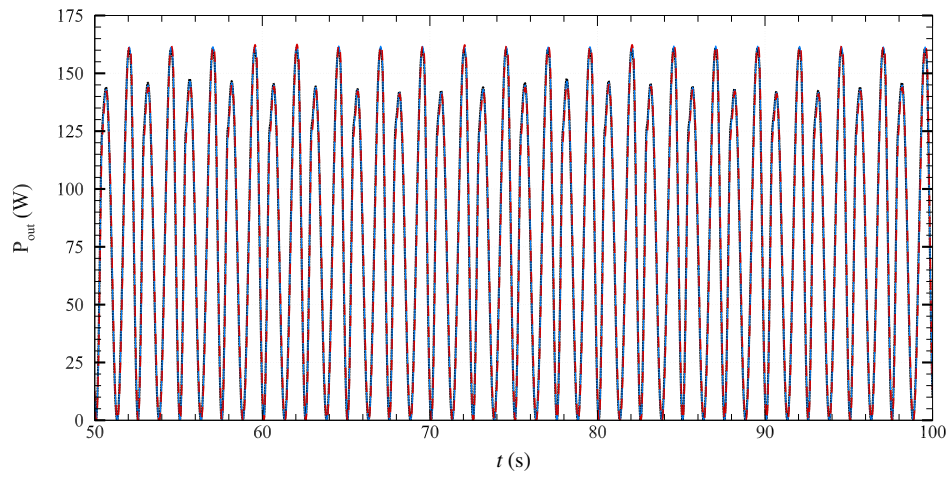


Figura 5.2: Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

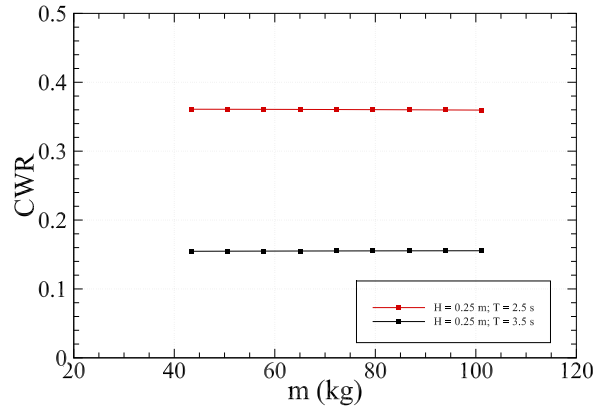


Figura 5.3: Influência da massa da placa oscilante na CWR.

### 5.3 Influência da altura do centro de massa

Nesta secção estuda-se a influência da altura do centro de massa da placa oscilante,  $\bar{z}$ , na dinâmica do OWSC. Esta análise é feita atribuindo diferentes valores a  $\bar{z}$  considerando que massa da placa se mantém constante,  $m = 72.3$  kg. A variação deste parâmetro origina a alteração dos momentos de inércia da placa oscilante e do coeficiente de restituição, uma vez que o centro de gravidade e o centro de massa da placa oscilante deixam de estar alinhados. Na Tabela 5.4 apresenta-se os valores da altura do centro de massa da placa e os respetivos momentos de inércia para os casos considerados.

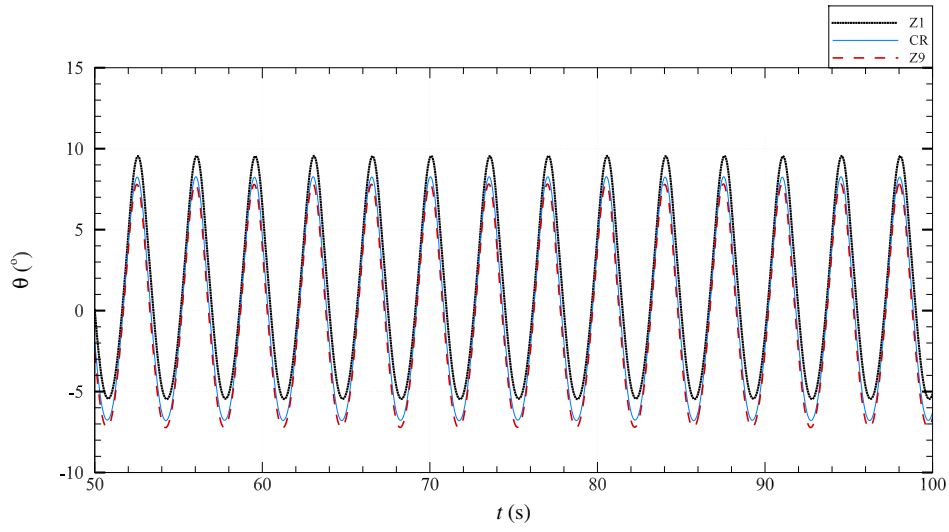
Tabela 5.4: Altura do centro de massa e momentos de inércia da placa oscilante.

Caso	$\bar{z}$ [m]	$I_{xx}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$I_{yy}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	$I_{zz}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
Z <sub>1</sub>	0.076	20.08	7.23	13.11
Z <sub>2</sub>	-0.024	19.70	6.85	13.11
Z <sub>3</sub>	-0.124	20.77	7.92	13.11
Z <sub>4</sub>	-0.224	23.29	10.44	13.11
CR	-0.394	30.87	18.02	13.11
Z <sub>6</sub>	-0.424	32.67	19.82	13.11
Z <sub>7</sub>	-0.524	39.52	26.67	13.11
Z <sub>8</sub>	-0.624	47.83	34.98	13.11
Z <sub>9</sub>	-0.724	57.58	44.73	13.11

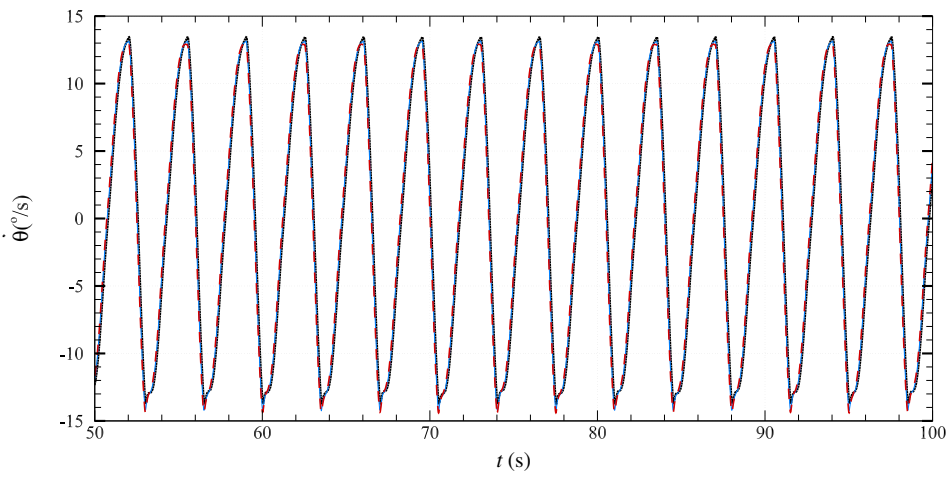
Nas Figuras 5.4 e 5.5 comparam-se a amplitude de rotação e a velocidade angular da placa e potência instantânea extraída pelo OWSC, dos casos CR, Z<sub>1</sub> e Z<sub>9</sub> para as condições AR1 e AR2, respetivamente.



(a)



(b)



(c)

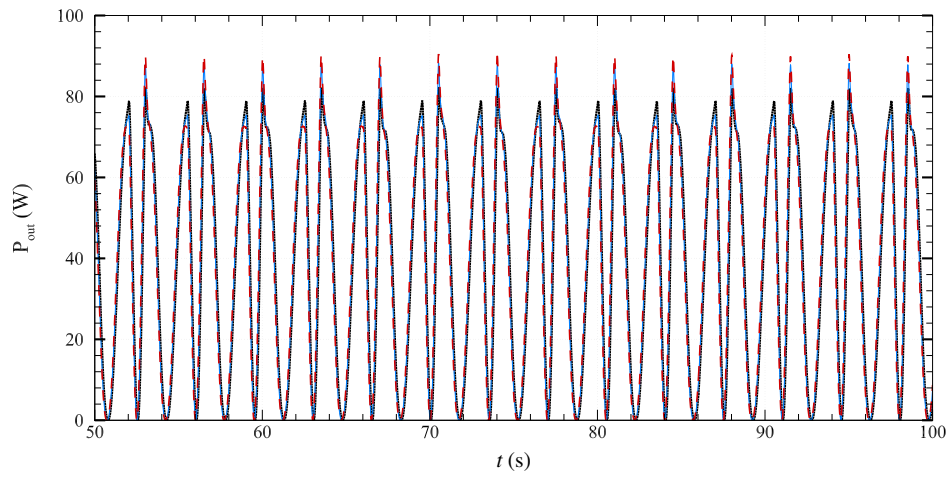
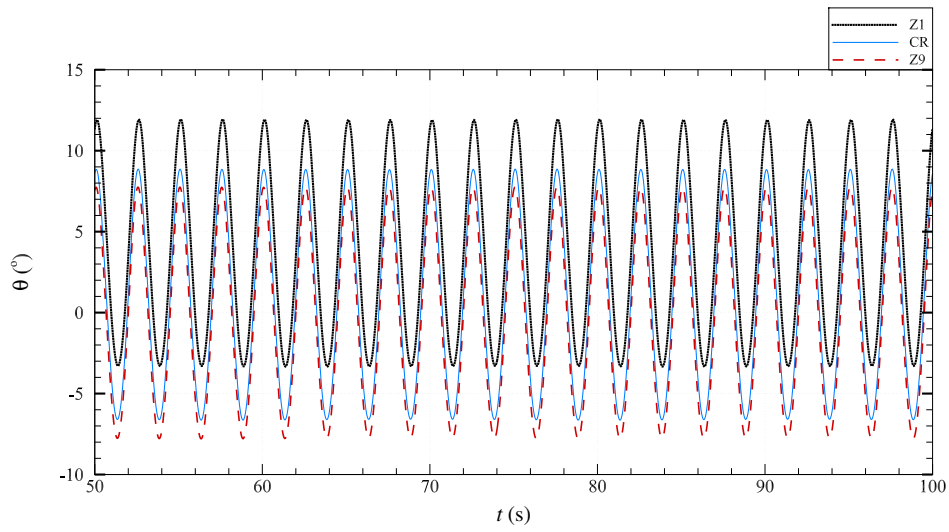
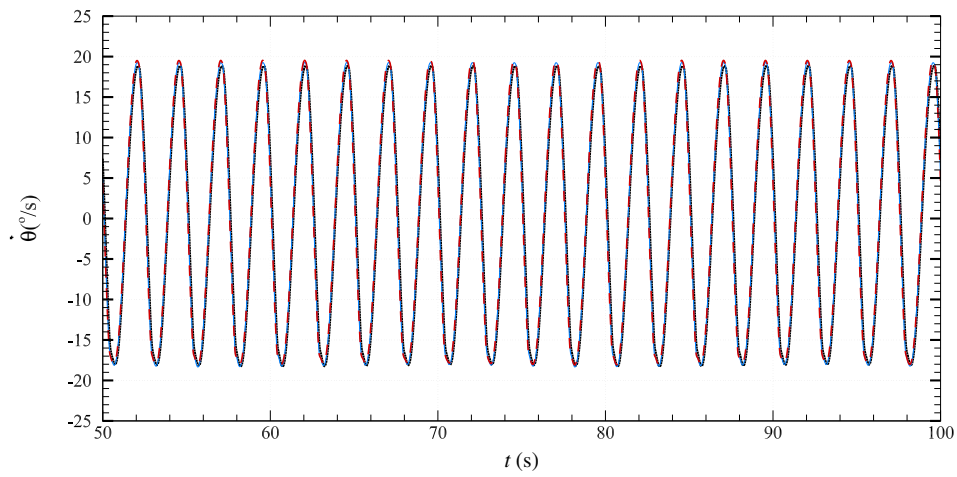


Figura 5.4: Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

(a)



(b)



(c)

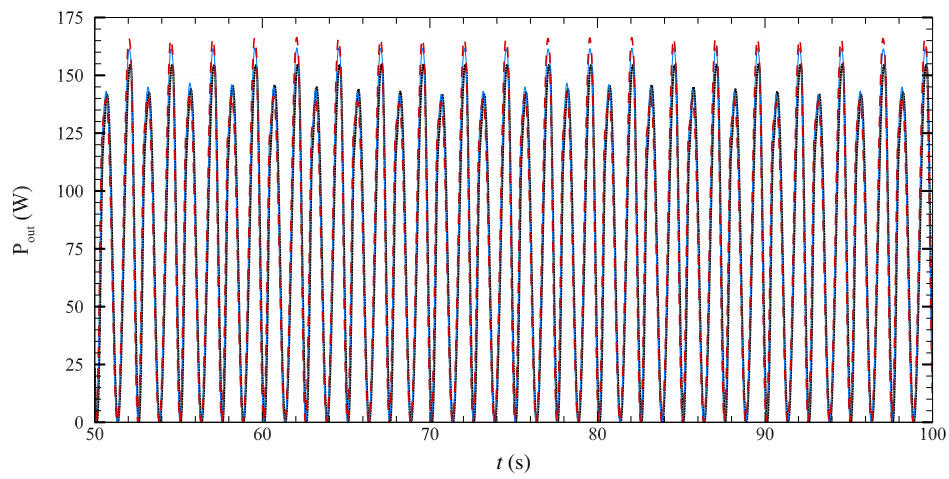


Figura 5.5: Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

Verifica-se que existe um desvio relativo ao ponto de equilíbrio da placa oscilante, mais acentuado para a condição AR2, embora a amplitude do movimento seja muito semelhante para todos os casos. Desta forma, tanto a velocidade angular da placa como a potência instantânea extraída pelo OWSC apresentam um comportamento muito idêntico.

A evolução de CWR com  $\bar{z}$  é apresentada na Figura 5.6. Embora a variação de CWR seja muito pequena, pode-se observar, em especial para a condição AR2, que CWR tende a aumentar até ao ponto em que a massa se distribui uniformemente por toda a placa (CR) e que a partir desse ponto, à medida que o centro de massa se aproxima da articulação, CWR tende a decrescer. A diferença máxima de CWR é de aproximadamente 2% e 4% para as condições AR1 e AR2, respetivamente.

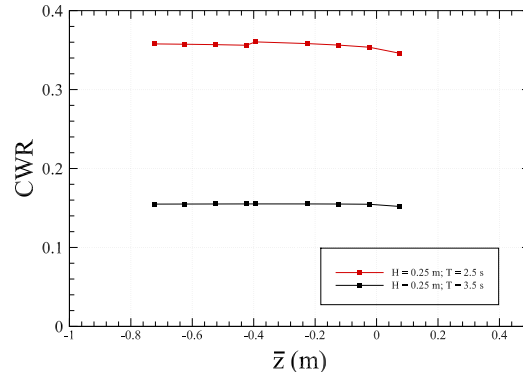


Figura 5.6: Influência de  $\bar{z}$  em CWR.

Os resultados numéricos, apresentados nesta secção, mostram que de um modo geral  $\bar{z}$  tem mais influência em CWR que  $m$ . Não obstante, esta dependência é pouco significativa.

## 5.4 Influência do período e comprimento de onda

Nesta secção analisa-se a influência das características da agitação na dinâmica do OWSC. Esta análise é feita variando o período e o comprimento de onda. Na Tabela 5.5 apresentam-se as condições ensaiadas. Como o declive da onda incidente tem de ser inferior a 1/7, em virtude do software utilizado não ter a capacidade de modelar a rebentação das ondas, para os períodos de onda mais pequenos não é possível efetuar as simulações para toda a gama de  $H$ .

De forma a avaliar a interação onda-OWSC, introduz-se nesta secção o conceito do RAO (*Response Amplitude Operator*), que descreve a relação entre a amplitude da agitação incidente e a respetiva resposta do sistema [47]. Neste contexto, o RAO pode ser obtido considerando a magnitude da velocidade angular da placa oscilante. Uma vez que o movimento da placa não é simétrico, ou seja,  $|\dot{\theta}_{max}| \neq |\dot{\theta}_{min}|$ , o RAO pode ser dado por [48]:

$$RAO = \frac{|\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}_{min}|}{H} \quad (5.5)$$

onde  $\dot{\theta}_{max}$  e  $\dot{\theta}_{min}$  representam o valor máximo e mínimo da velocidade angular da placa oscilante, respetivamente.

Tabela 5.5: Condições da agitação ensaiadas.

H [m]	T [s]
0.050	[1.00; 1.25; 1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.075	[1.00; 1.25; 1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.100	[1.00; 1.25; 1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.125	[1.25; 1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.150	[1.25; 1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.175	[1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.200	[1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.225	[1.50; 1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.250	[1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.275	[1.75; 2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.300	[2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.325	[2.00; 2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.350	[2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.375	[2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]
0.400	[2.25; 2.50; 2.75; 3.00; 3.25; 3.50; 3.75; 4.00; 4.25; 4.50; 4.75; 5.00; 5.25; 5.50; 5.75; 6.00]

Na Figura 5.7 apresenta-se a variação do RAO para as condições da agitação apresentadas na Tabela 5.5. Pode-se observar que o RAO apresenta um pico de ressonância relativamente bem definido, ainda que seja perceptível uma forte influência do efeito de amortecimento do sistema PTO. Verifica-se também a existência de uma clara dependência entre o RAO e a amplitude da agitação incidente, dado que quanto maior é o  $H$ , maior é o RAO.

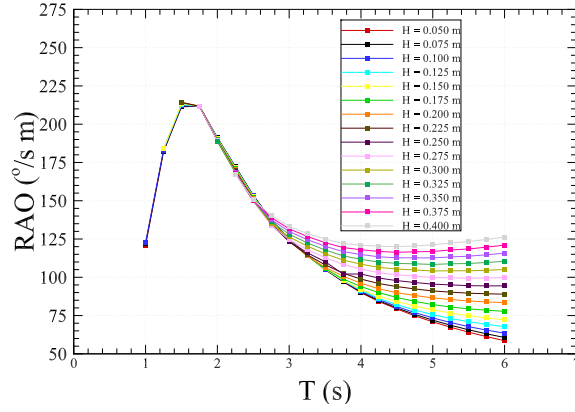


Figura 5.7: Variação do RAO com o período para várias alturas de onda da agitação incidente.

Na Figura 5.8 apresenta-se a evolução da potência média extraída para as condições apresentadas na Tabela 5.5.

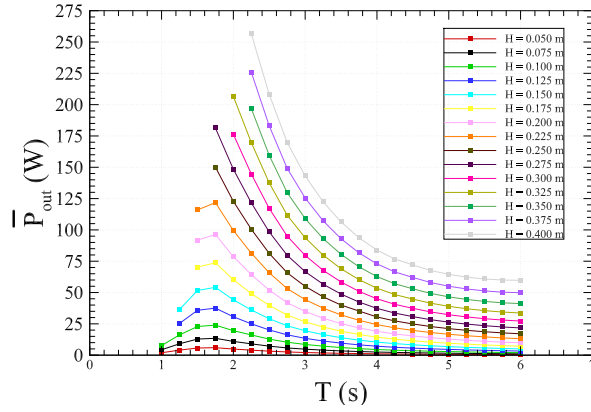


Figura 5.8: Influência da agitação regular na potência média extraída.

Observa-se que os resultados sugerem um ponto de funcionamento ótimo do OWSC para um período de onda compreendido entre  $T = 1.50$  s e  $T = 1.75$  s, coincidente com o pico observado na Figura 5.7, nas simulações em que foi possível considerar esse período de onda. Nos restantes casos, o maior valor da potência média extraída pelo OWSC coincide com o menor  $T$  possível. A partir do valor máximo de  $\bar{P}_{out}$ , todas as simulações apresentam uma curva descendente acabando por estabilizar para os períodos de onda maiores, apresentando um comportamento semelhante à evolução do RAO. Observa-se também que quanto maior é a altura da onda incidente, maior é a potência média extraída, estabelecendo-se um sentido de crescimento de  $\bar{P}_{out}$ , do menor para o maior  $H$ .

Na Figura 5.9 apresenta-se a evolução da CWR. Este parâmetro não varia de forma significativa com o aumento de  $H$ , contrariamente ao RAO, uma vez que no cálculo da CWR se considera o quadrado da velocidade angular da placa e o quadrado de  $H$ , ao

invés do RAO, o que diminui a diferença de valores. No entanto, observa-se uma clara correlação entre CWR e RAO, uma vez que o valor máximo da CWR ocorre para o máximo do RAO.

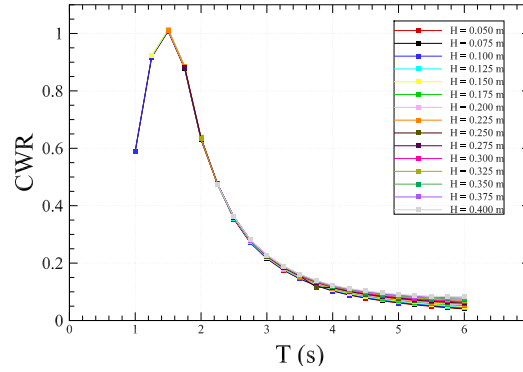


Figura 5.9: Influência da agitação na CWR.

## 5.5 Influência do sistema PTO

Nesta secção analisa-se a influência do sistema PTO na dinâmica do OWSC. Neste contexto, efetuaram-se, inicialmente, dois testes distintos. No primeiro teste, fez-se variar o valor do coeficiente de rigidez da mola mantendo-se inalterável o valor do coeficiente de amortecimento,  $C_{PTO} = 50 \text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ}/\text{s})$ . Na Tabela 5.6 apresentam-se os valores de  $K_{PTO}$  considerados em cada simulação.

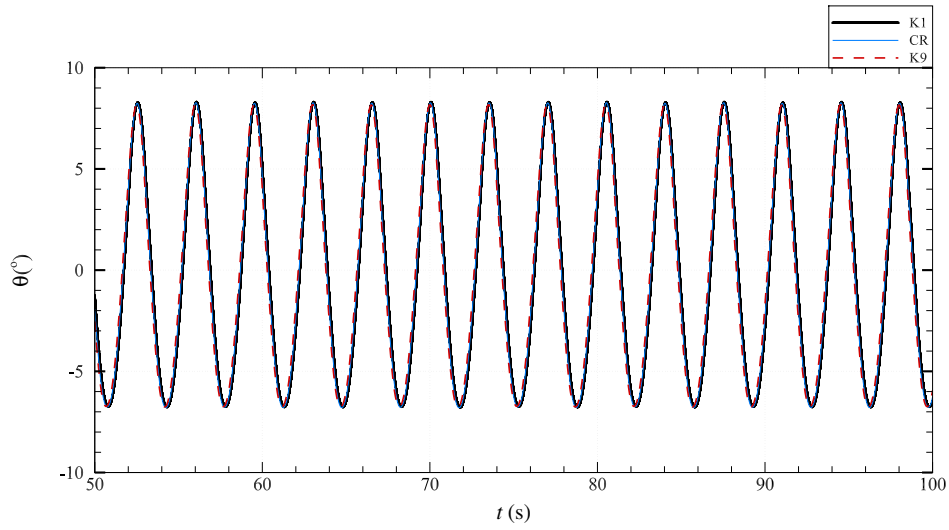
Tabela 5.6: Coeficientes de rigidez da mola para os casos considerados.

Caso	$K_{PTO} [\text{N}\cdot\text{m}/^{\circ}]$
$K_1$	2
$K_2$	4
$K_3$	6
$K_4$	8
CR	10
$K_6$	12
$K_7$	14
$K_8$	16
$K_9$	18

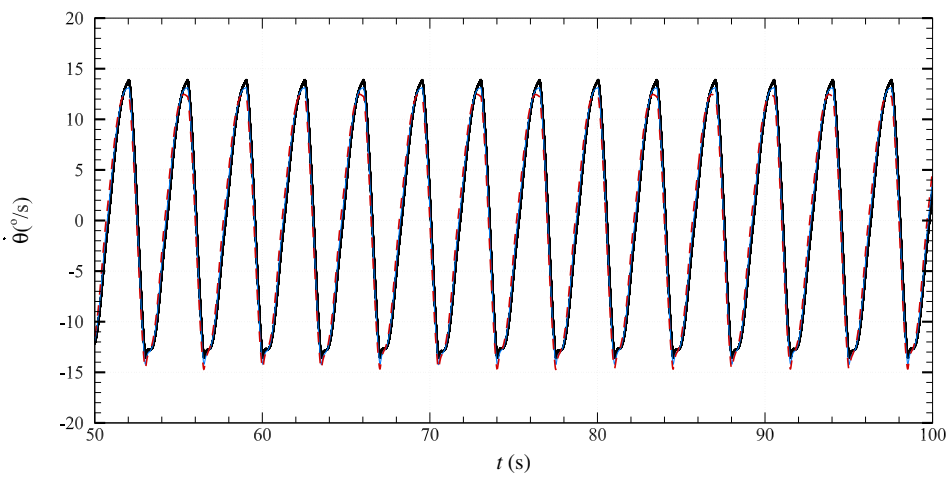
Nas Figuras 5.10 e 5.11 comparam-se as séries temporais da rotação e velocidade angular da placa oscilante e da potência instantânea extraída dos casos CR,  $K_1$  e  $K_9$  para as condições AR1 e AR2, respetivamente.

Observa-se a sobreposição das curvas para todos os casos, o que permite concluir que para o coeficiente de amortecimento considerado,  $C_{PTO} = 50 \text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ}/\text{s})$ , o coeficiente de rigidez da mola do sistema PTO tem um efeito pouco significativo na dinâmica do OWSC.

(a)



(b)



(c)

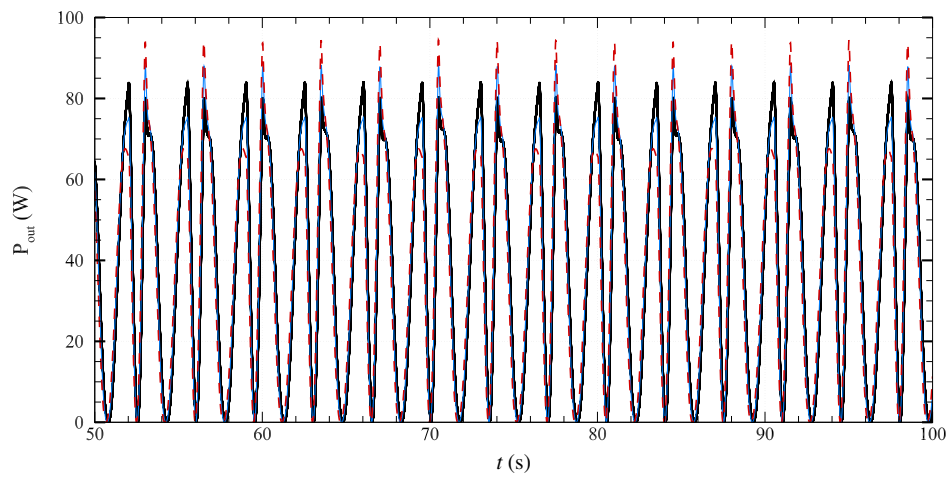
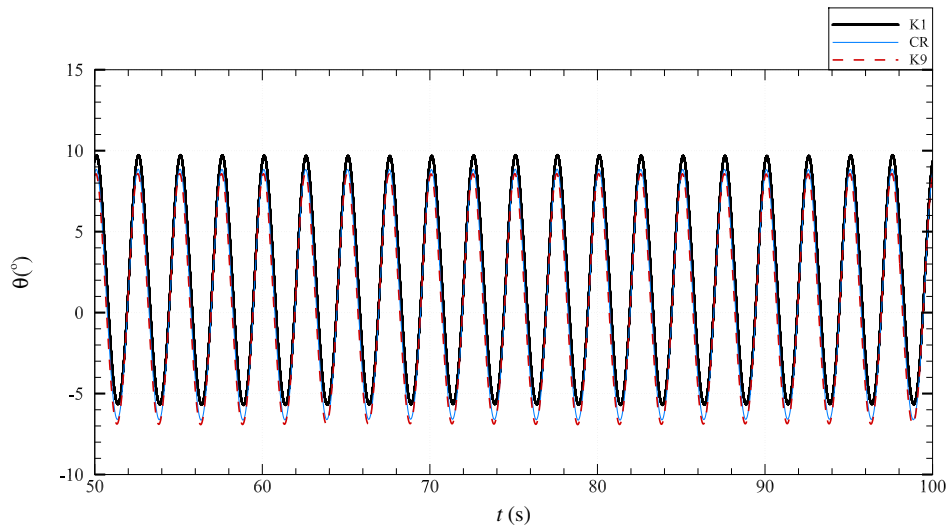
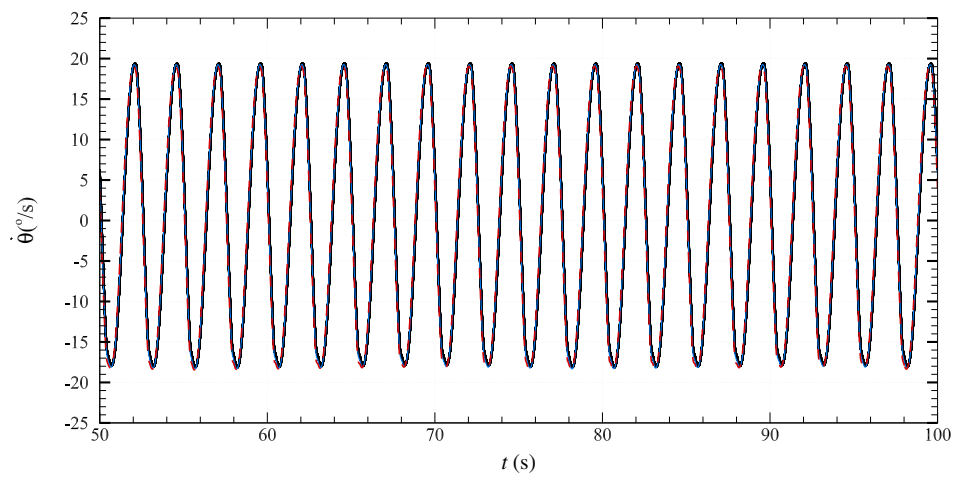


Figura 5.10: Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

(a)



(b)



(c)

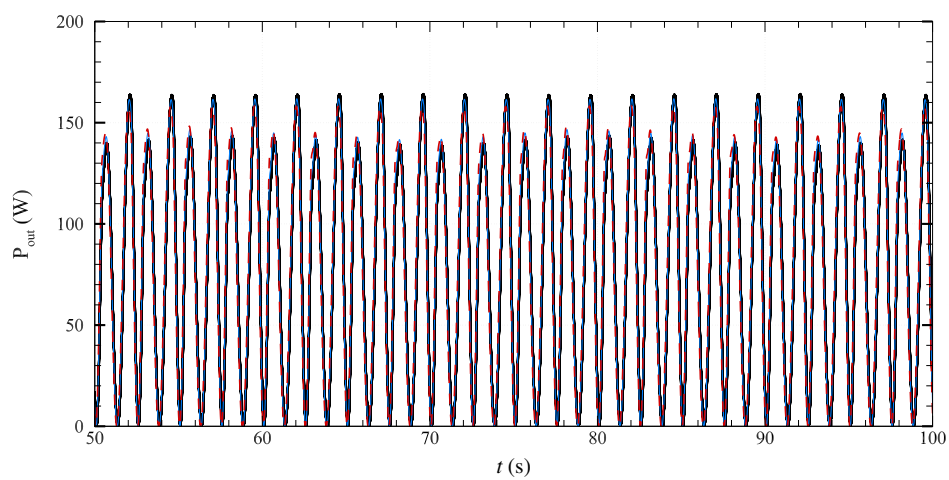


Figura 5.11: Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.



Na Figura 5.12 apresenta-se a evolução de CWR em função de  $K_{PTO}$ .

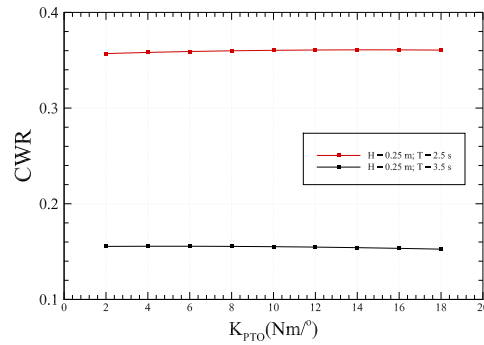


Figura 5.12: Influência do  $K_{PTO}$  na CWR.

Nota-se que o coeficiente de rigidez da mola do sistema PTO não tem influência significativa na CWR, uma vez que este se mantém praticamente constante para ambas as condições de agitação, confirmando a anterior conclusão.

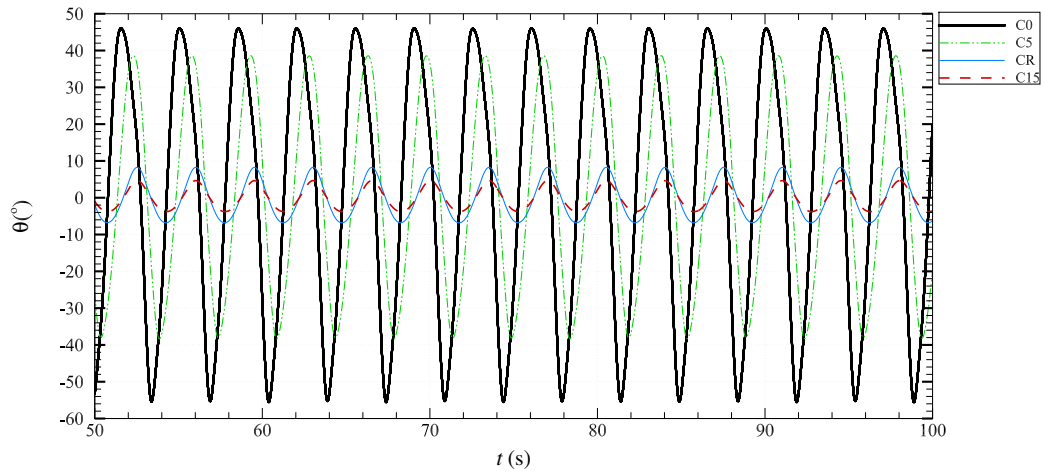
No segundo teste, fez-se variar o valor de  $C_{PTO}$  mantendo-se  $K_{PTO} = 10 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ . Na Tabela 5.7 apresentam-se os valores de  $C_{PTO}$  considerados em cada simulação.

Tabela 5.7: Coeficientes de amortecimento para os casos considerados.

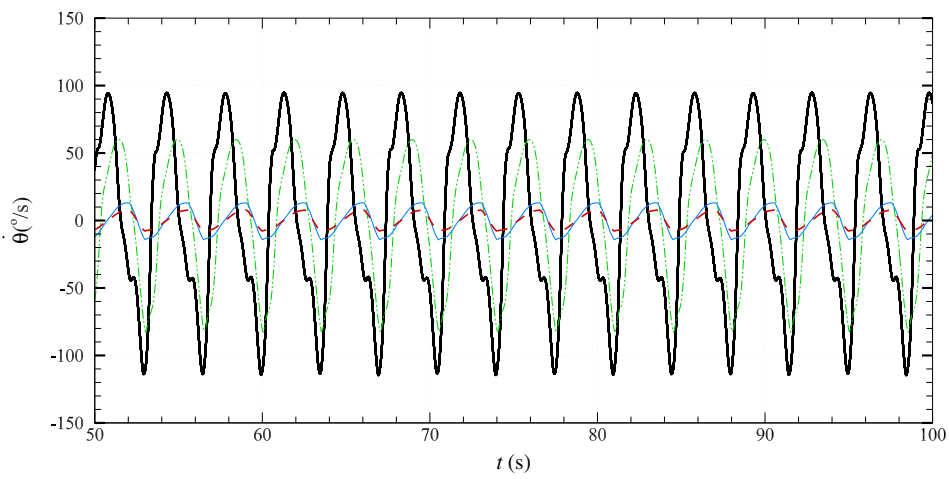
Caso	$C_{PTO}$ [N·m/(°/s)]
$C_0$	0
$C_1$	1.25
$C_2$	2.5
$C_3$	3.75
$C_4$	5
$C_5$	7.5
$C_6$	10
$C_7$	12.5
$C_8$	20
$C_9$	30
$C_{10}$	40
$CR$	50
$C_{12}$	60
$C_{13}$	70
$C_{14}$	80
$C_{15}$	90

Na Figura 5.13 comparam-se as séries temporais da rotação e velocidade angular da placa oscilante e da potência instantânea extraída dos casos  $CR$ ,  $C_0$ ,  $C_5$  e  $C_{15}$  para a condição  $AR1$ . Na Figura 5.14 comparam-se as séries temporais da rotação e velocidade angular da placa oscilante e da potência instantânea extraída dos casos  $CR$ ,  $C_0$ ,  $C_4$  e  $C_{15}$  para a condição  $AR2$ .

(a)



(b)



(c)

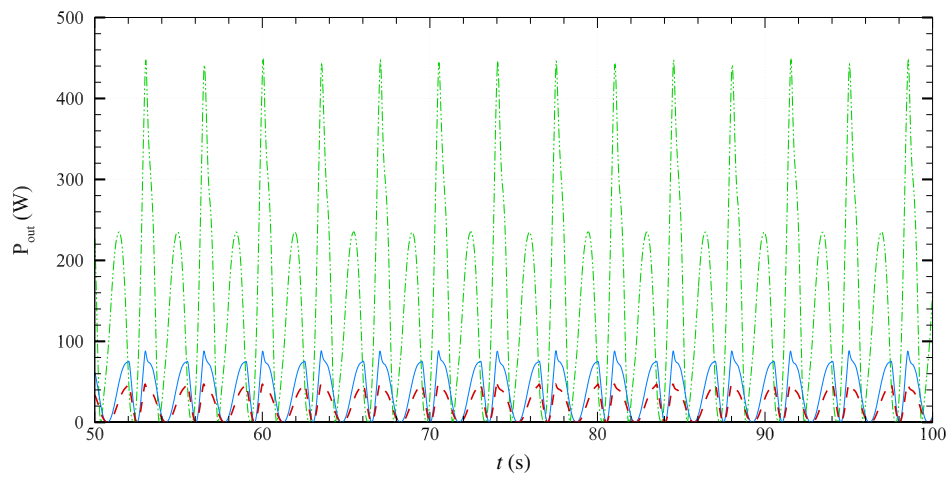
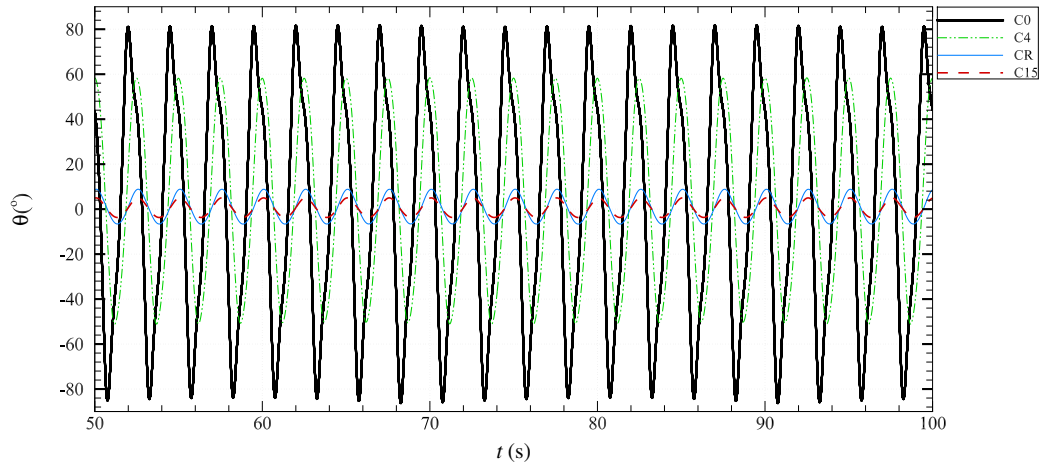
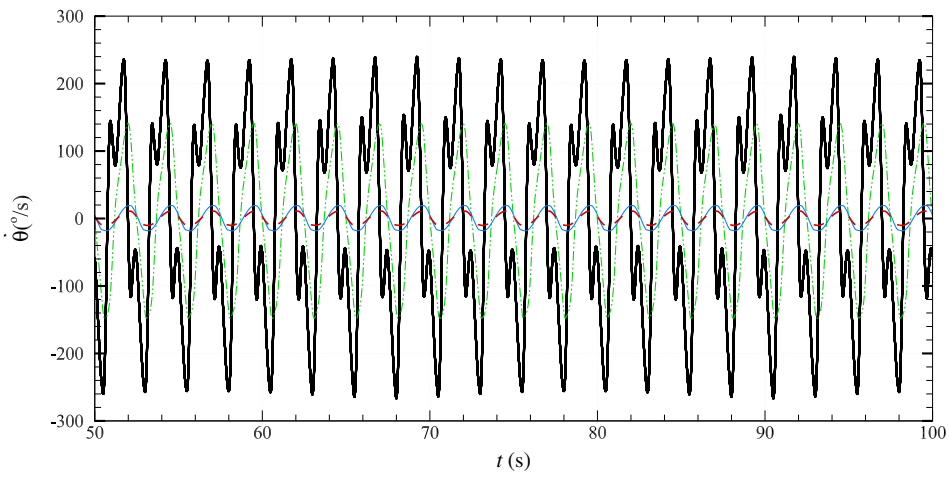


Figura 5.13: Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

(a)



(b)



(c)

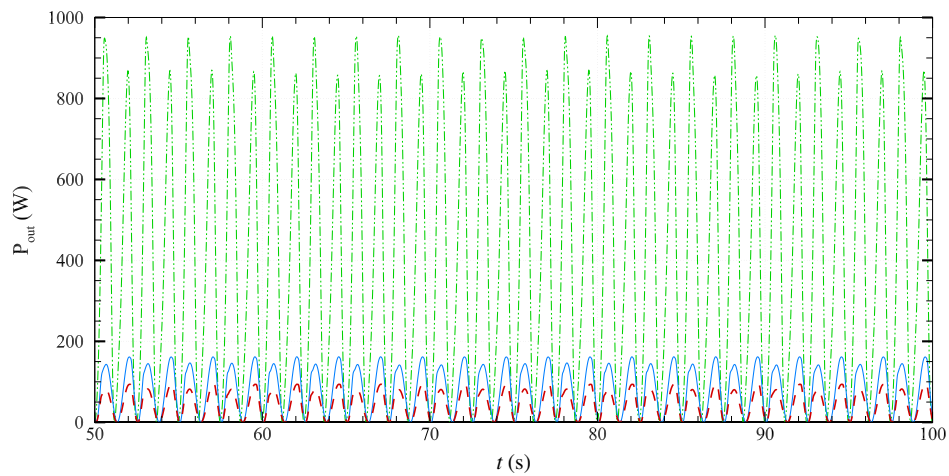


Figura 5.14: Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

Na Figura 5.15 apresenta-se a evolução de CWR em função do  $C_{PTO}$ .

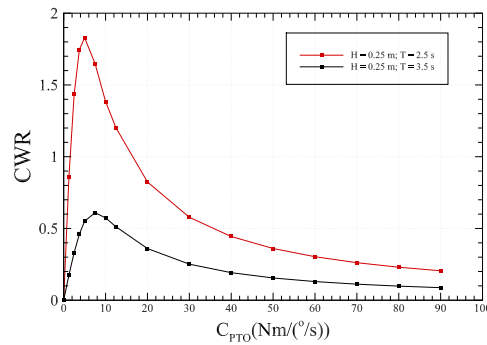


Figura 5.15: Influência do  $C_{PTO}$  na CWR.

Contrariamente ao coeficiente de rigidez da mola, o coeficiente de amortecimento do sistema PTO afeta de forma significativa a CWR. Verifica-se que, para ambas as condições de agitação, CWR aumenta até um valor máximo começando de seguida a diminuir, descrevendo uma parábola, e à medida que os valores de  $C_{PTO}$  aumentam CWR tende a ser cada vez menor acabando por estabilizar. Este comportamento é explicado pelas grandes amplitudes de rotação da placa oscilante, facilmente identificáveis nas Figuras 5.13 e 5.14, que diminuem acentuadamente com o aumento de  $C_{PTO}$ .

A análise da variação da CWR com o coeficiente de amortecimento do sistema PTO permitiu também verificar que o valor considerado no caso referência,  $C_{PTO} = 50$  N·m/(°/s), é desadequado, uma vez que apresenta um valor de CWR correspondente muito pequeno e afastado do valor ótimo. Por este motivo, realizou-se um teste adicional em que se fez variar o valor do coeficiente de rigidez da mola, considerando  $C_{PTO} = 7.5$  N·m/(°/s). Na Tabela 5.8 apresentam-se os valores de  $K$  considerados em cada caso.

Tabela 5.8: Coeficientes de rigidez da mola para os casos considerados.

Caso	$K_{PTO}$ [N·m/°]
$K_{n0}$	0
$K_{n1}$	1
$K_{n2}$	2
$K_{n3}$	4
$K_{n4}$	6
$K_{n5}$	8
$K_{n6}$	10
$K_{n7}$	12
$K_{n8}$	14
$K_{n9}$	16
$K_{n10}$	18
$K_{n11}$	20
$K_{n12}$	25
$K_{n13}$	30

Nas Figuras 5.17 e 5.18 comparam-se as séries temporais da rotação e velocidade angular da placa oscilante e da potência instantânea extraída dos casos  $K_{n1}$ ,  $K_{n6}$  e  $K_{n13}$  para as condições AR1 e AR2, respetivamente.

Nota-se que para um coeficiente de amortecimento mais reduzido, o coeficiente de rigidez da mola tem uma influência significativa na dinâmica da placa oscilante. Como seria expectável, quanto maior o valor de  $K_{PTO}$  menor é a amplitude de rotação da placa e, consequentemente, menor será a sua velocidade angular e a potência instantânea extraída pelo OWSC.

Na Figura 5.16 apresenta-se a evolução de CWR com a variação de  $K_{PTO}$  para  $C_{PTO} = 7.5 \text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ}/\text{s})$ .

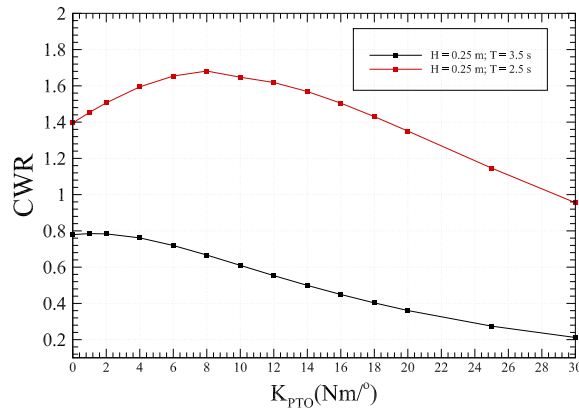
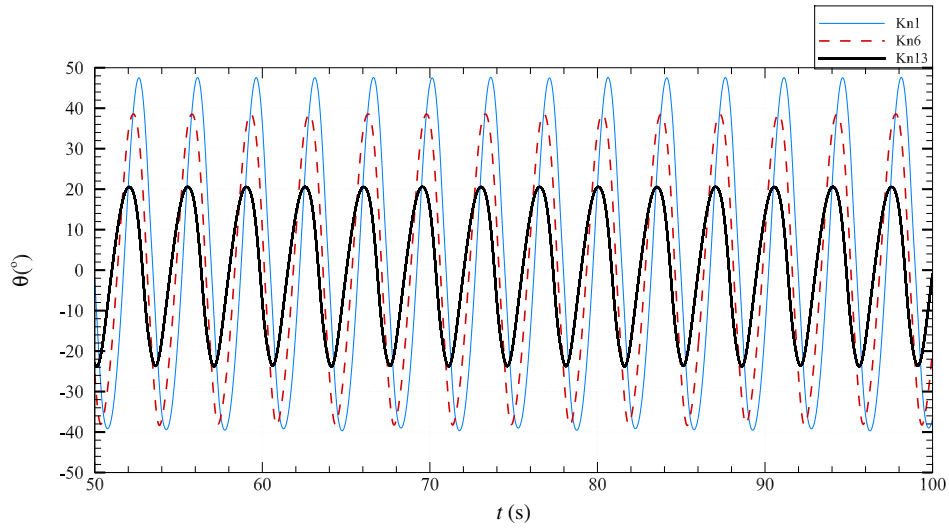


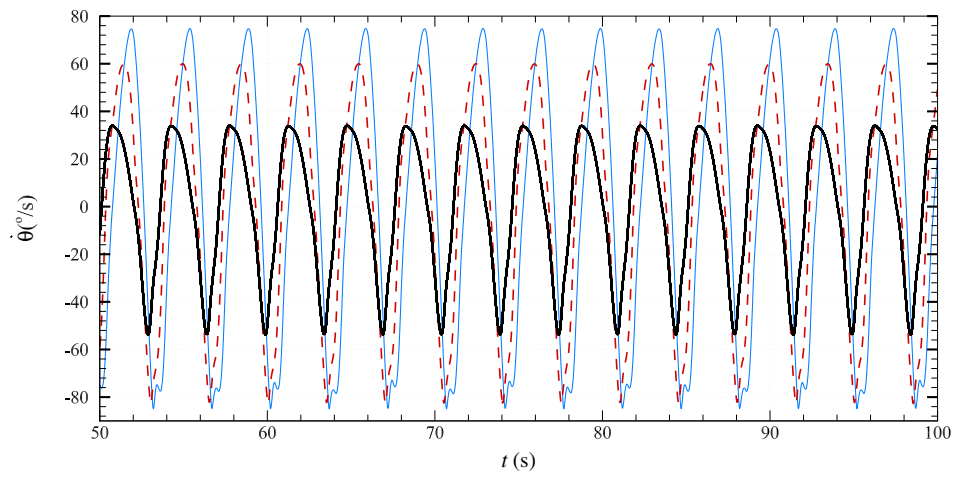
Figura 5.16: Influência do  $K_{PTO}$  na CWR.

Neste contexto, conclui-se que contrariamente ao sugerido na Figura 5.12, o coeficiente de rigidez da mola tem uma influência na dinâmica da placa oscilante. Portanto, o elevado valor do coeficiente de amortecimento utilizado no caso referência estava a sobrepor-se ao efeito do  $K_{PTO}$ .

(a)



(b)



(c)

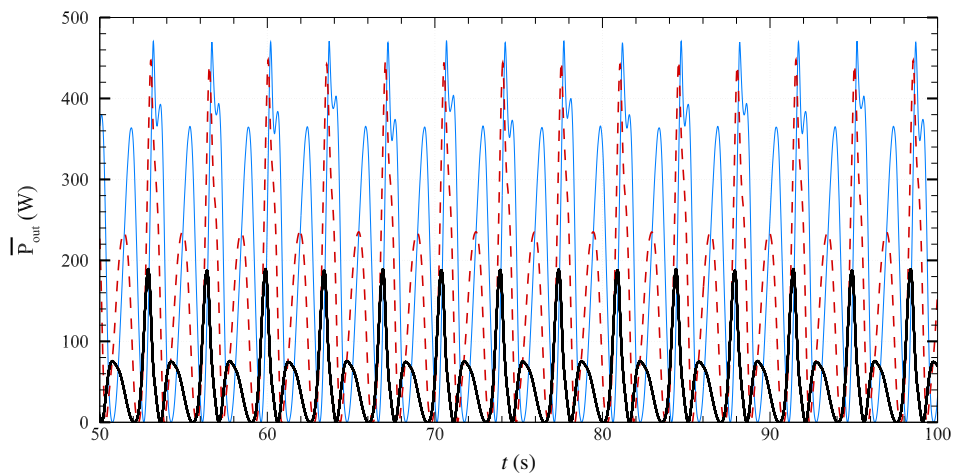
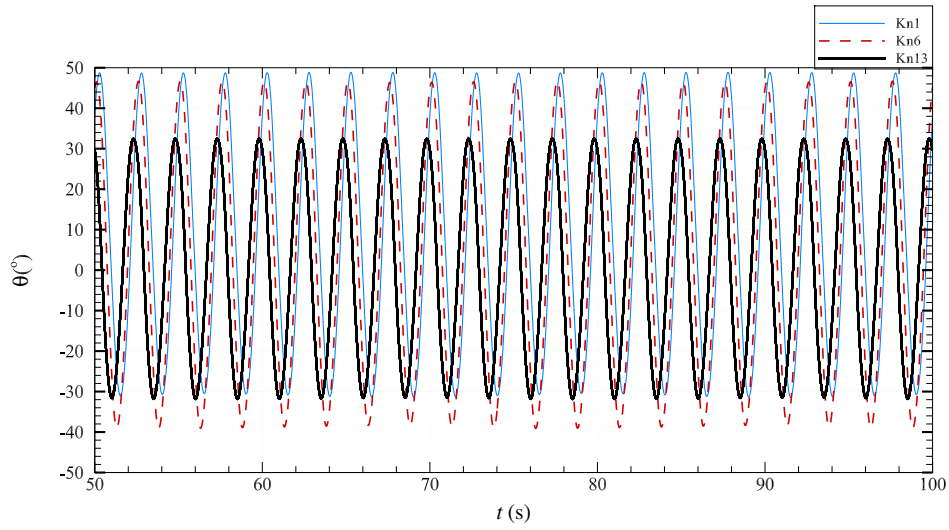
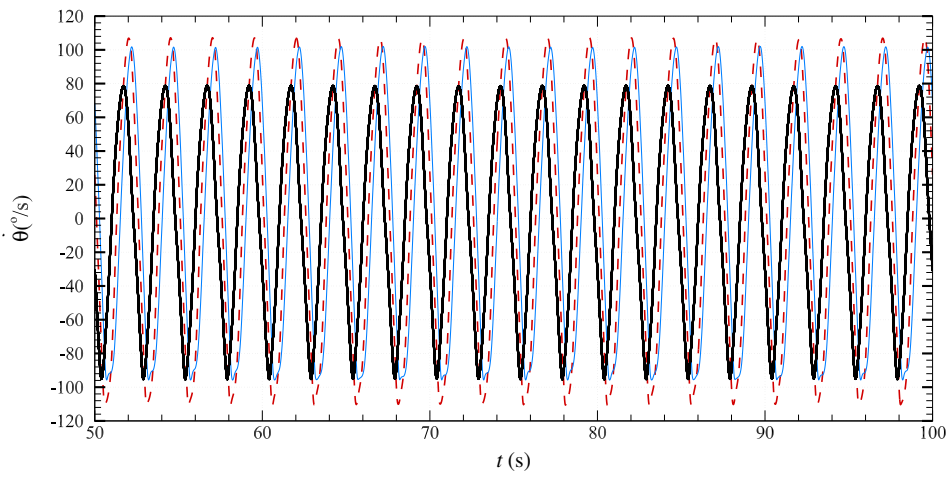


Figura 5.17: Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

(a)



(b)



(c)

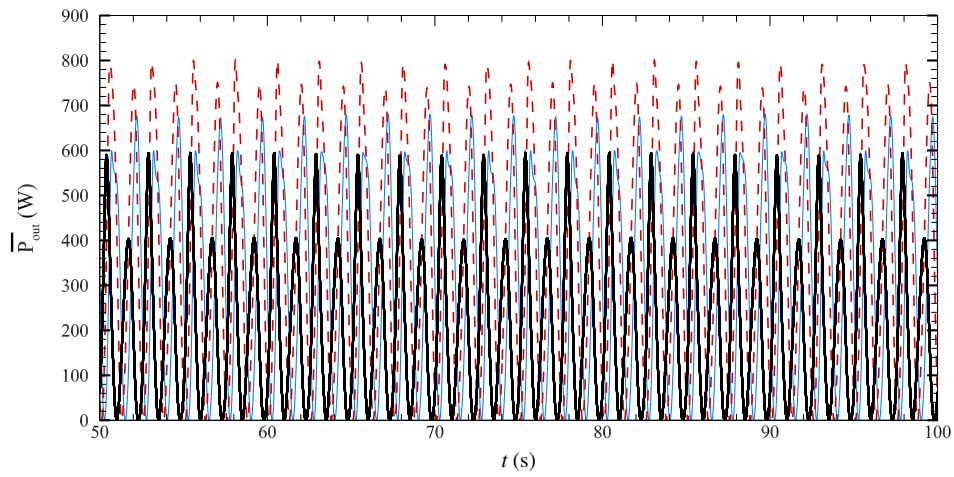


Figura 5.18: Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

Por fim, efetuou-se um último conjunto de simulações onde se fez variar simultaneamente os valores dos coeficientes de rigidez e de amortecimento do sistema PTO. Na Tabela 5.9 apresentam-se os casos considerados.

Tabela 5.9: Coeficientes de rigidez da mola e de amortecimento para os casos considerados.

Caso	$K_{PTO}$ [N·m/°]	$C_{PTO}$ [N·m/(°/s)]
PTO <sub>0</sub>	0	0
PTO <sub>1</sub>	1	1.25
PTO <sub>2</sub>	2	2.50
PTO <sub>3</sub>	4	3.75
PTO <sub>4</sub>	6	5
PTO <sub>5</sub>	8	7.50
PTO <sub>6</sub>	10	10
PTO <sub>7</sub>	12	12.50
PTO <sub>8</sub>	14	20
PTO <sub>9</sub>	16	30
PTO <sub>10</sub>	18	40
PTO <sub>11</sub>	20	50
PTO <sub>12</sub>	25	60
PTO <sub>13</sub>	30	70

Nas Figuras 5.20 e 5.21 comparam-se as séries temporais da rotação e velocidade angular da placa oscilante e da potência instantânea extraída dos casos PTO<sub>1</sub>, PTO<sub>3</sub>, PTO<sub>7</sub> e PTO<sub>13</sub> para as condições AR1 e AR2, respetivamente.

Verifica-se que, tal como seria esperado, o aumento da componente elástica e do amortecimento do sistema PTO traduz-se numa redução das amplitudes de rotação da placa oscilante.

Na Figura 5.19 apresenta-se a evolução da CWR para os diferentes sistemas PTO.

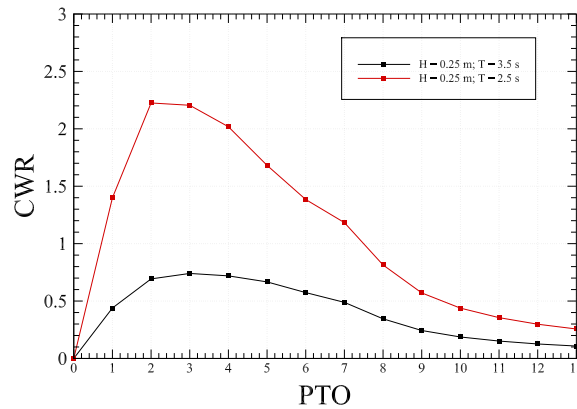


Figura 5.19: Influência do sistema PTO na CWR.

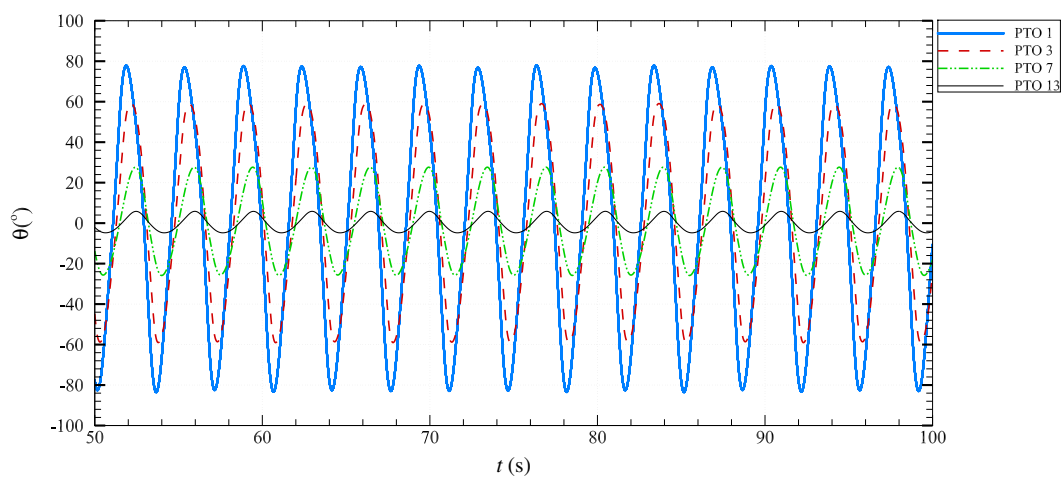
Os elevados valores que podem ser observados são pouco realistas e resultam das



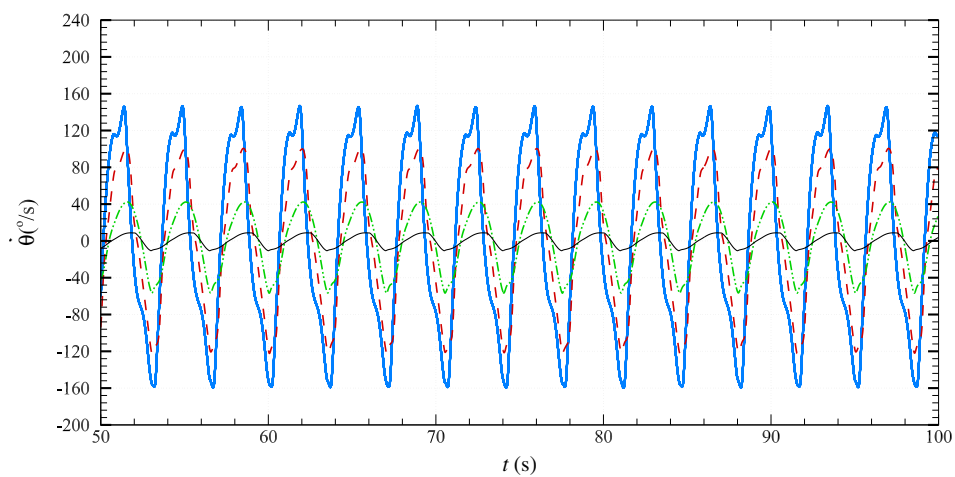
grandes amplitudes de rotação da placa oscilante, tal como acontece nas Figuras 5.15 e 5.16. Por se basear num modelo analítico linear, o programa ANSYS Aqwa não consegue descrever de forma precisa movimentos de grandes amplitudes. Nestas situações, os efeitos não-lineares, como a rotação do escoamento e os efeitos viscosos, têm uma forte influência na dinâmica do OWSC e quando ignorados podem comprometer de forma significativa a precisão dos resultados.

Constata-se, em todas as simulações realizadas neste capítulo, que a CWR é sempre mais elevada para a condição de agitação AR2. Tal facto pode ser explicado pelo período de onda da agitação incidente considerado na condição AR2 ( $T = 2.5$  s) se encontrar mais perto do pico de ressonância (ver Figura 5.7), que o período de onda para a condição AR1 ( $T = 3.5$  s).

(a)



(b)



(c)

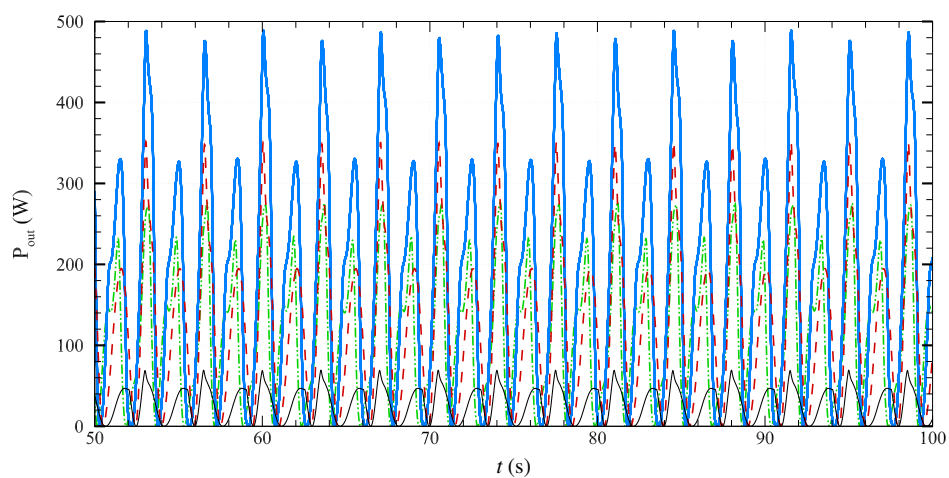
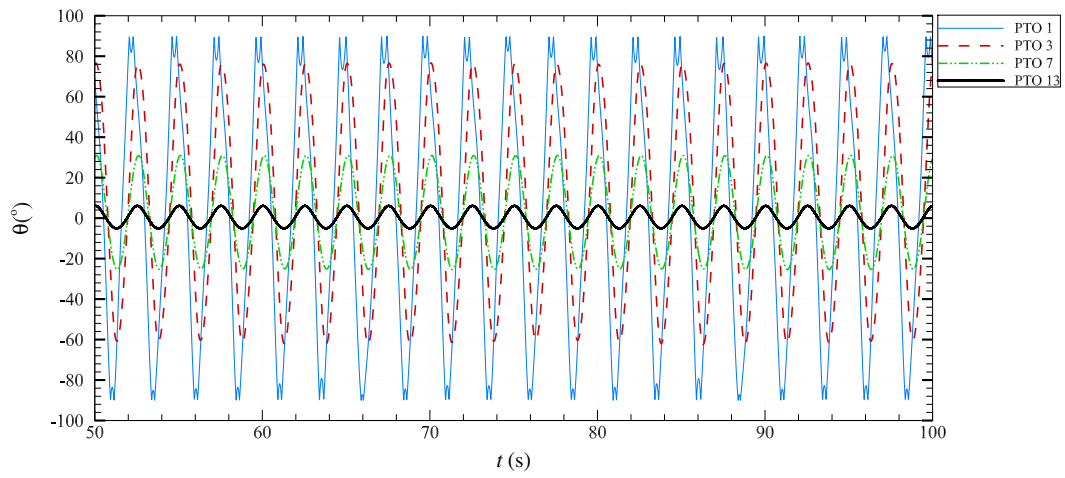
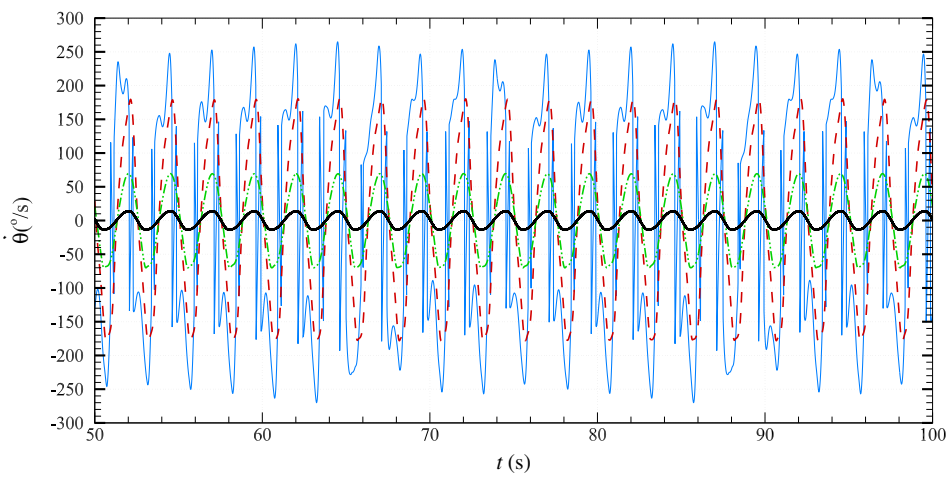


Figura 5.20: Série temporal para a condição AR1: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.

(a)



(b)



(c)

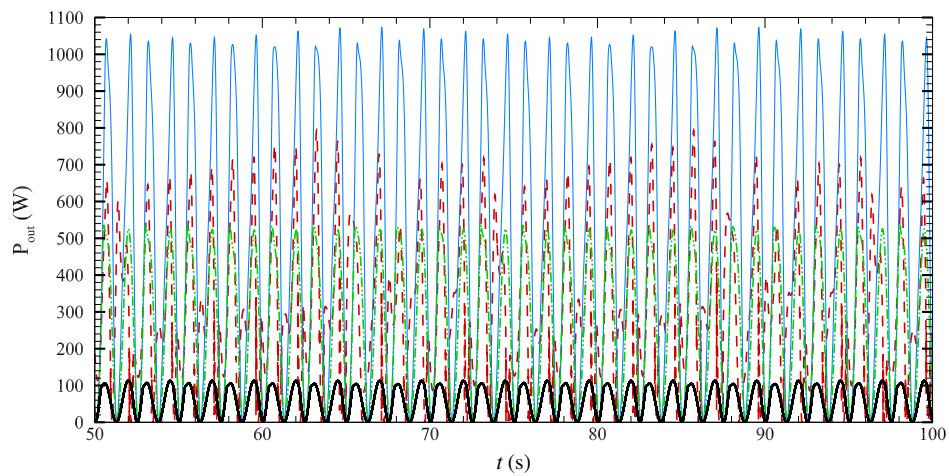


Figura 5.21: Série temporal para a condição AR2: (a) rotação da placa; (b) velocidade angular da placa; (c) potência instantânea extraída.



## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

O trabalho apresentado nesta dissertação centra-se na aplicação de uma ferramenta numérica capaz de simular o comportamento hidrodinâmico de um *Oscillating Wave Surge Converter*. Neste contexto, foi necessário compreender as características do escoamento e a dinâmica do OWSC, perceber o modo de funcionamento e as equações base do programa utilizado e ainda validar a ferramenta numérica.

A metodologia adotada para a aplicação da ferramenta numérica consistiu, inicialmente, na modelação geométrica da estrutura a ser estudada. Posteriormente, procedeu-se à definição das condições de fronteira e das condições da agitação incidente e verificou-se, após tratamento dos dados em MatLab, se a solução era ótima. Caso não fosse ótima, a geometria da estrutura, as condições de fronteira e as condições da agitação incidente eram revistas e novamente definidas.

A validação do modelo numérico foi realizada através da comparação dos resultados numéricos com dados existentes na literatura. Desta forma, a validação foi feita de duas formas distintas: (i) a dinâmica de um corpo oscilante com geometria cilíndrica acoplado a um sistema PTO foi validada com testes para analisar a frequência amortecida do dispositivo e para avaliar o movimento angular do mesmo quando excitado por ondas regulares; (ii) a hidrodinâmica de um OWSC sem qualquer tipo de restrição mecânica foi validada analisando-se o movimento angular do dispositivo para agitação regular.

A boa concordância verificada entre os resultados numéricos e experimentais mostraram que a ferramenta numérica é capaz de simular a dinâmica de corpos oscilantes. Neste sentido, os resultados obtidos permitiram ganhar confiança na metodologia implementada e principiar a análise numérica da influência de diferentes parâmetros na cinemática de um OWSC.

Foi analisada a influência da massa e altura do centro de massa da placa oscilante, do período e comprimento de onda da agitação incidente (para agitação regular) e dos coeficientes de rigidez e amortecimento do sistema PTO na dinâmica do OWSC e na potência extraída pelo mesmo.

Os resultados mostraram que a massa da placa oscilante não tem influência significativa no comportamento dinâmico da placa nem na potência média extraída pelo OWSC. A evolução do *Capture Width Ratio* veio confirmar a anterior conclusão mantendo uma evolução praticamente constante com a variação da massa da placa oscilante. No entanto, quando considerados casos extremos (massa muito elevada e muito reduzida) conclui-se que a influência da massa induz efeitos contraditórios na dinâmica do OWSC, contrariando a ideia de que uma placa com menor inércia deveria apresentar movimentos de maior amplitude. Constatou-se, precisamente, a situação inversa: uma massa muito reduzida tem uma componente das forças verticais aproximada à força de restituição, o que impede o movimento da placa.

Relativamente à altura do centro de massa da placa oscilante, os resultados numéricos demonstraram que, de um modo geral, este parâmetro tem mais influência na dinâmica do OWSC e, consequentemente, na evolução de CWR que a massa da placa. Não obstante, esta dependência é pouco significativa.

No que respeita às condições da agitação incidente (agitação regular), uma análise ao comportamento do RAO permitiu concluir que o OWSC apresenta um pico de ressonância relativamente bem definido, ainda que o efeito de amortecimento do sistema PTO seja bem perceptível. Além disso, observou-se uma clara correlação entre CWR e RAO, em virtude do máximo valor de CWR ocorrer para o máximo valor do RAO.

Por fim, a análise do sistema PTO revelou que tanto o coeficiente de rigidez da mola como o coeficiente de amortecimento influenciam, de forma significativa, a cinemática da placa oscilante e, consequentemente, a potência extraída pelo OWSC e o CWR. No entanto, dadas as grandes amplitudes de rotação da placa oscilante e as limitações do modelo analítico linear, no qual o programa ANSYS Aqwa se baseia, em lidar com grandes movimentos, em virtude dos efeitos fortemente não-lineares do escoamento e da interação onda-placa, que o programa não consegue replicar de maneira precisa, alguns dos resultados obtidos acabam por ser pouco realistas.

## 6.2 Trabalhos futuros

De forma a dar sequência ao trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se nesta secção algumas sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Neste trabalho, a hidrodinâmica do OWSC foi caracterizada apenas para agitação regular. Assim sendo, uma proposta interessante seria estudar o efeito da agitação irregular na dinâmica do OWSC.

É também necessário investigar a influência que diferentes configurações geométricas da placa oscilante possam ter no comportamento dinâmico da placa, de modo a otimizar

a potência extraída pelo OWSC.

Por último, na presente dissertação, estudou-se apenas a instalação de um único OWSC. Do ponto de vista económico seria mais proveitoso considerar uma instalação com vários OWSCs. Desta forma, seria útil estudar qual a forma mais vantajosa de distribuir os dispositivos, como por exemplo estudar a distância entre placas oscilantes.





## BIBLIOGRAFIA

- [1] EIA. “International Energy Outlook 2017 Overview”. Em: *U.S. Energy Information Administration IEO2017* (2017), p. 143.
- [2] C. V. Weiss, R. Guanche, B. Ondiviela, O. F. Castellanos e J. Juanes. “Marine renewable energy potential: A global perspective for offshore wind and wave exploitation”. Em: *Energy conversion and management* 177 (2018), pp. 43–54.
- [3] A. Clément, P. McCullen, A. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, T. Pontes, P. Schild, B.-O. Sjöström, H. Sørensen e T. Thorpe. “Wave energy in Europe: current status and perspectives”. Em: *Renewable and sustainable energy reviews* 6.5 (2002), pp. 405–431.
- [4] T. Whittaker e M. Folley. “Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster”. Em: *Phil. Trans. R. Soc. A* 370.1959 (2012), pp. 345–364.
- [5] F. d. O. Antonio. “Wave energy utilization: A review of the technologies”. Em: *Renewable and sustainable energy reviews* 14.3 (2010), pp. 899–918.
- [6] A. F. Falcão. “Phase control through load control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic PTO system”. Em: *Ocean Engineering* 35.3-4 (2008), pp. 358–366.
- [7] D. Magagna e A. Uihlein. “2014 JRC ocean energy status report”. Em: *European Commission Joint Research Centre* (2015).
- [8] A Henry, K Doherty, L Cameron, T Whittaker e R Doherty. “Advances in the design of the Oyster wave energy converter”. Em: *RINA Marine and Offshore Energy Conference*. 2010.
- [9] M. G. de Brito. “Numerical modeling and experimental testing of an oscillating wave surge converter”. Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico, 2018.
- [10] P. Schmitt, S. Bourdier, D. Sarkar, E. Renzi, F. Dias, K. Doherty, T. Whittaker e J. van’t Hoff. “Hydrodynamic Loading on a Bottom Hinged Oscillating Wave Surge Converter”. Em: *Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece*. 2012.
- [11] T. Whittaker e M. Folley. “Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster”. Em: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370.1959 (2012), pp. 345–364.

- [12] T. Whittaker, D. Collier, M. Folley, M. Osterried, A. Henry e M. Crowley. "The development of Oyster - a shallow water surging wave energy converter". Em: *Proceedings of the 7th European wave and tidal energy conference*. Porto, Portugal. 2007, pp. 11–14.
- [13] L. Cameron, R. Doherty, A. Henry, K. Doherty, J. V. Hoff, D. Kaye, D. Naylor, S. Bourdier e T. Whittaker. "Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter". Em: *3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao*. 2010.
- [14] E. Renzi e F. Dias. "Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean". Em: *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 41 (2013), pp. 1–10.
- [15] T. Thorpe. "An overview of wave energy technologies: status, performance and costs". Em: *Wave power: moving towards commercial viability* 26 (1999), pp. 50–120.
- [16] J. Cruz. *Ocean Wave Energy*. Ed. por J. Cruz. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [17] B. Ram, R. Thresher, N. K. Fall e R. Bedard. "Wave Power in the USA: permitting and Jurisdictional Issues (E21 Global EPRI DOE NREL report)". Em: (2004).
- [18] S. Patrício, A. Moura e T. Simas. "Wave energy and underwater noise: State of art and uncertainties". Em: *OCEANS 2009-EUROPE*. IEEE. 2009, pp. 1–5.
- [19] C. Mei, M. Stiassnie e D. Yue. *Theory and applications of ocean surface waves*. World Scientific, 2005.
- [20] R. G. Dean e R. A. Dalrymple. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Vol. 2. World Scientific Publishing Company, 1991.
- [21] J. Newman. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1977.
- [22] L. H. Holthuijsen. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press, 2010.
- [23] A. ANSYS. "AQWA theory manual". Em: *ed. Canonsburg, PA* 15317 (2013).
- [24] I. R. Young. *Wind generated ocean waves*. Elsevier, 1999.
- [25] R. Dean e R. Dalrymple. *Water Wave Mechanics for Enginners and Scientists*. Ed. por W. Scientific. Vol. 2. Advanced Series on Ocean Engineering, 1991.
- [26] M. A. Maâtoug e M. Ayadi. "Numerical simulation of the second-order Stokes theory using finite difference method". Em: *Alexandria Engineering Journal* 55.3 (2016), pp. 3005–3013.
- [27] B. Bocking. "Numerical and experimental modelling of an oscillating wave surge converter in partially standing wave systems". Tese de doutoramento. University of Victoria, 2017.

- 
- [28] M. Brito, L. Teixeira, R. B. Canelas, R. M. L. Ferreira e M. G. Neves. “Experimental and Numerical Studies of Dynamic Behaviors of a Hydraulic Power Take-Off Cylinder Using Spectral Representation Method”. Em: *Journal of Tribology* 140.2 (2017), p. 021102.
- [29] I. F.M. M. da Cruz Alves. “Hydrodynamical Analysis of Bottom-hinged Oscillating Wave Surge Converters”. Tese de mestrado. Instituto Superior Técnico, 2016.
- [30] E. Renzi e F. Dias. “Resonant behaviour of an oscillating wave energy converter in a channel”. Em: *Journal of Fluid Mechanics* 701 (2012), pp. 482–510.
- [31] J. Falnes. *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction*. Cambridge University Press, Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom, 2002. ISBN: 0521017491.
- [32] N. D. F. Gonçalves. “Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.
- [33] L. Qian, C. Mingham, D. Causon, D. Ingram, M. Folley e T. Whittaker. “Numerical simulation of wave power devices using a two-fluid free surface solver”. Em: *Modern Physics Letters B* 19.28-29 (2005), pp. 1479–1482.
- [34] J. Lucas, M. Livingstone, N. Vuorinen e J. Cruz. “Development of a wave energy converter (WEC) design tool - application to the WaveRoller WEC including validation of numerical estimates”. Em: *Fourth International Conference on Ocean Energy, Dublin, Ireland*. 2012.
- [35] D. Zhang, Y. Shi, C. Huang, Y. Si, B. Huang e W. Li. “SPH method with applications of oscillating wave surge converter”. Em: *Ocean Engineering* 152 (2018), pp. 273–285.
- [36] M. Brito, O. García-Feal, J. M. Domínguez, A. J. C. Crespo, R. B. Canelas, R. M. L. Ferreira e M. G. Neves. “Coupling between DualSPHysics and Chrono-Engine: towards large scale HPC multiphysics simulations”. Em: *11th SPHERIC International Workshop, Munich, Germany*. 2016.
- [37] A. Crespo, C. Altomare, J. Domínguez, J. González-Cao e M. Gómez-Gesteira. “Towards simulating floating offshore oscillating water column converters with Smoothed Particle Hydrodynamics”. Em: *Coastal Engineering* 126 (2017), pp. 11–26.
- [38] R. Gomes, M. Lopes, J. Henriques, L. Gato e A. Falcão. “The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves”. Em: *Ocean Engineering* 96 (2015), pp. 86–99.
- [39] A. Ansys. “User Manual v. 13.0, 2010”. Em: *Century Dynamics Ltd.: Horsham, UK* (2010).

- [40] B. Peña e A. McDougall. “An Investigation Into the Limitations of the Panel Method and the Gap Effect for a Fixed and a Floating Structure Subject to Waves”. Em: *ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers. 2016.
- [41] N. Tomás. “Modelação numérica de corpos flutuantes – extratores pontuais”. Tese de mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [42] S. A. Malik, G Pan e Y. Liu. “Numerical simulations for the prediction of wave forces on underwater vehicle using 3D panel method code”. Em: *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5.21 (2013), pp. 5012–5021.
- [43] A. Silva. “Modelação numérica de um dispositivo pontual de aproveitamento de energia das ondas”. Tese de mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [44] F. Flocard e T. D. Finnigan. “Laboratory experiments on the power capture of pitching vertical cylinders in waves”. Em: *Ocean Engineering* 37.11-12 (2010), pp. 989–997.
- [45] H. Behzad e R. Panahi. “Optimization of bottom-hinged flap-type wave energy converter for a specific wave rose”. Em: *Journal of Marine Science and Application* 16.2 (2017), pp. 159–165.
- [46] A. J. C. Crespo, C. Altomare, J. M. Domínguez, J. González-Cao e M. Gómez-Gesteira. “Towards simulating floating offshore oscillating water column converters with smoothed particle hydrodynamics”. Em: *Coastal Engineering* 126 (2017), pp. 11–26.
- [47] H. Santo, P. H. Taylor, E. C. Moreno, P. Stansby, R. E. Taylor, L. Sun e J. Zang. “Extreme motion and response statistics for survival of the three-float wave energy converter M4 in intermediate water depth”. Em: *Journal of Fluid Mechanics* 813 (2017), pp. 175–204.
- [48] F. Flocard e T. Finnigan. “Increasing power capture of a wave energy device by inertia adjustment”. Em: *Applied Ocean Research* 34 (2012), pp. 126–134.